VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

ББК 31.261
З-62
УДК [658.26 : 621.313] (075.3)

Рецензенты: Томский электромеханический техникум и Л. В. Томилин

Зимин Е. Н. и др.

З-62 Электрооборудование промышленных предприятий и установок/Е. Н. Зимин, В. И. Преображенский, И. И. Чувашов: Учебник для техникумов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоиздат, 1981.— 552 с., ил.

В пер.: 1 р. 10 к.

В книге изложены вопросы электрооборудования и автоматизации наиболее характерных и распространенных технологических установок, станков и машин промышленных предприятий. Даны примеры по расчету и выбору двигателей и другого электрооборудования. Приведены электрические схемы управления общепромышленными установками.

Первое издание вышло в 1968 г. под названием «Электрооборудование промышленных предприятий и установок в машиностроении». Во 2-м издании, полностью обновлённом, рассмотрены электрооборудование и установки предприятий электромашиностроения.

Книга предназначена в качестве учебника для электромеханических техникумов.

ББК 31.261
6П2.1.081

З $\frac{30307-533}{051(012)-81}$ 87-81(Э). 2302030000

© Энергоиздат, 1981

ПРЕДИСЛОВИЕ

В предлагаемой книге рассмотрены основное электрооборудование, вопросы автоматизации, электрические схемы электротермических и электросварочных установок, подъемно-транспортных машин и механизмов, металлообрабатывающих станков и машин, насосов, компрессоров, вентиляторов и некоторых других установок, получивших распространение на промышленных предприятиях электромашиностроения.

Книга написана в соответствии с программой предмета «Электрооборудование промышленных предприятий и установок отрасли» для учащихся средних специальных учебных заведений.

В книгу не вошел материал только по разделу программы «Электрическое освещение», по которому есть отдельное учебное пособие.

По сравнению с первым изданием, выпущенным в 1968 г. под названием «Электрооборудование промышленных предприятий и установок в машиностроении», материал книги переработан и обновлен с учетом последних достижений и тенденций развития в области электрооборудования и автоматизации промышленного производства.

Изложение базируется на знании читателями предметов «Теоретические основы электротехники», «Электрические машины и трансформаторы», «Основы промышленной электроники», «Основы автоматики и вычислительной техники», «Электрический привод» и «Основы технологии отрасли».

В первом издании книги в написании гл. 1, 2, 14, 19 и 20 принимал участие И. И. Чувашов.

Во 2-м издании главы 1, 2, 14, 15 и 19 написаны Е. Н. Зиминым, главы 3—13, 16—18, 20 и 21 написаны В. И. Преображенским. Редактирование рукописи произвели: В. П. Цишевский — гл. 1—5, 14, 17—19 и Р. С. Сарбатов — гл. 6—13, 15, 16, 20, 21.

Авторы будут признательны читателям, приславшим свои замечания, и просят направлять их в адрес Энергоиздата: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Электрификация народного хозяйства СССР является основой строительства экономики коммунистического общества и развития производительных сил страны. Электрификация обеспечивает выполнение задачи широкой комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, что позволяет усилить темпы роста производительности общественного труда, улучшить качество продукции и облегчить условия труда. На базе использования электроэнергии ведется техническое перевооружение промышленности, внедрение новых технологических процессов и осуществление коренных преобразований в организации производства и управлении им. Поэтому в современной технологии и оборудовании промышленных предприятий велика роль электрооборудования, т. е. совокупности электрических машин, аппаратов, приборов и устройств, посредством которых производится преобразование электрической энергии в другие виды энергии и обеспечивается автоматизация технологических процессов.

Электромашиностроение — одна из ведущих отраслей машиностроительной промышленности. Процесс изготовления электрической машины складывается из операций, в которых используется разнообразное технологическое оборудование. При этом основная часть современных электрических машин изготовляется методами поточно-массового производства. Специфика электромашиностроения заключается главным образом в наличии таких процессов, как изготовление и укладка обмоток электрических машин, для чего применяется нестандартизованное оборудование, изготовляемое обычно самими электромашиностроительными заводами. В преобладающей же своей части технологическое оборудование и электрооборудование электромашиностроительных заводов типичны для машиностроения в целом.

Электромашиностроение характерно многообразием технологических процессов, использующих электроэнергию: литейное производство, сварка, обработка металлов и материалов давлением и резанием, термообработка и т. д. Предприятия электромашиностроения широко оснащены электрифицированными подъемно-транспортными механизмами, насосными, компрессорными и вентиляторными установками. Автоматизация затрагивает не только отдельные агрегаты и вспомогательные механизмы, но во все большей степени целые комплексы их, образующие полностью автоматизированные поточные линии и цехи.

Первостепенное значение для автоматизации производства имеют многодвигательный электропривод и средства электрического управления. Развитие электропривода идет по пути упрощения механических передач и приближения электродвигателей к рабочим органам машин и механизмов, а также возрастающего применения электрического регулирования скорости приводов. Широко внедряются комплектные тиристорные преобразовательные устройства. Применение тиристорных преобразователей не только позволило создать высокоэкономичные регулируемые электроприводы постоянного тока, но и открыло большие возможности для использования частотного регулирования двигателей переменного тока, в первую очередь наиболее простых и надежных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Все большее распространение получают новейшие средства электрической автоматизации технологических установок, машин и механизмов на базе полупроводниковой техники, высокочувствительной контрольно-измерительной и регулирующей аппаратуры, бесконтактных датчиков и логических элементов. Расширяется область применения программного управления технологическими объектами с записью программы на бумажной или магнитной ленте. Для управления технологическими процессами все чаще используются электронные вычислительные машины.

В современных условиях эксплуатация электрооборудования требует глубоких и разносторонних знаний, а задачи создания нового или модернизации существующего электрифицированного технологического агрегата, механизма или устройства решаются совместными усилиями технологов, механиков и электриков. Требования к электрооборудованию вытекают из технологических данных и условий. Электрооборудование нельзя рассматривать в отрыве от конструктивных и технологических особенностей электрифицируемого объекта, и наоборот. Поэтому специалисты в области электрооборудования промышленных предприятий должны быть хорошо знакомы как с электрической частью, так и с основами технологических процессов и конструкциями установок электронагрева и электросварки, металлообрабатывающих станков и машин, подъемно-транспортных механизмов и т. д.

Электрооборудование промышленных предприятий и установок проектируется, монтируется и эксплуатируется в соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) и другими руководящими документами.

Глава первая

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОНАГРЕВА

1-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Электронагрев широко применяется на предприятиях электромашиностроения при производстве фасонного литья из металлов и сплавов, нагрева заготовок перед обработкой давлением, термической обработки деталей и узлов электрических машин, сушки изоляционных материалов и т. д.

Электротермической установкой (ЭТУ) называют комплекс, состоящий из электротермического оборудования (электрической печи или электротермического устройства[1], в которых электрическая энергия преобразуется в тепловую), и электрического, механического и другого оборудования, обеспечивающего осуществление рабочего процесса в установке.

Электротермическое оборудование весьма разнообразно по принципу действия, конструкции и назначению. В наиболее общей форме все электрические печи и электротермические устройства можно разделить по назначению на *плавильные печи* для выплавки или перегрева расплавленных металлов и сплавов и *термические* (нагревательные) *печи и устройства* для термообработки изделий из металла, нагрева материалов под пластическую деформацию, сушки изделий и т. д. По способу преобразования электрической энергии в тепловую различают, в частности, печи и устройства сопротивления, дуговые печи, индукционные печи и устройства.

В электропечах и электротермических устройствах сопротивления используется выделение тепла электрическим током при прохождении его через твердые и жидкие тела. Электропечи этого вида преимущественно выполняются как печи косвенного нагрева. Превращение электроэнергии в тепло в них происходит в твердых нагревательных элементах, от которых тепло путем излучения, конвекции и теплопроводности передается нагреваемому телу, либо в жидком теплоносителе — расплав-

[1] Электротермическое устройство отличается от электропечи отсутствием камеры нагрева.

ленной соли, в которую погружается нагреваемое тело, и тепло передается ему путем конвекции и теплопроводности. Печи сопротивления — самый распространенный и многообразный вид электропечей.

Плавильные печи сопротивления применяют преимущественно при производстве литья из легкоплавких металлов и сплавов. Термические печи используются для термообработки металлов и сушки материалов и изделий. Электротермические устройства сопротивления работают по принципу прямого нагрева: подлежащее нагреву тело непосредственно служит проводником тела и в нем выделяется тепло.

Работа плавильных дуговых электропечей основана на выделении тепла в дуговом разряде. В электрической дуге концентрируется большая мощность и развивается температура свыше 3500° С. В дуговых печах косвенного нагрева дуга горит между электродами, а тепло передается расплавляемому телу в основном излучением. Печи такого рода используют при производстве фасонного литья из цветных металлов, их сплавов и чугуна. В дуговых печах прямого нагрева одним из электродов служит само расплавляемое тело. Эти печи предназначены для выплавки стали, тугоплавких металлов и сплавов. В дуговых печах прямого нагрева, в частности, выплавляют большую часть стали для фасонного литья.

В индукционных печах и устройствах тепло в электропроводном нагреваемом теле выделяется токами, индуктированными в нем переменным электромагнитным полем. Таким образом, здесь осуществляется прямой нагрев. Индукционную печь или устройство можно рассматривать как своего рода трансформатор, в котором первичная обмотка (индуктор) подключена к источнику переменного тока, а вторичной обмоткой служит само нагреваемое тело. Индукционные плавильные печи применяют при производстве литья, в том числе фасонного, из стали, чугуна, цветных металлов и сплавов. Нагревательные индукционные печи используют для нагрева заготовок под пластическую деформацию и для проведения разного рода термообработки. Индукционные термические устройства применяют для поверхностной закалки и других специализированных операций.

Серийно выпускаемое отечественной промышленностью электротермическое оборудование имеет обозначения, отражающие способ нагрева, конструктивные признаки и особенности технологического характера. Такое обозначение состоит из трех основных букв, нескольких цифр и вспомогательных букв. Первая основная буква указывает на способ нагрева, например: Д — дуговой, И — индукционный, С — сопротивлением.

У плавильных печей вторая основная буква обозначения определяет основной металл, для плавки которого предназначена печь: А — алюминий и его сплавы; М — медь и ее сплавы (кроме латуни); Л — латунь; О — олово, свинец, баббит; С — сталь и жаропрочные сплавы; Ч — чугун и др. Третья основная буква характеризует важнейший конструктивный признак плавильной печи, например, для дуговых печей: П — с поворотным сводом; Б — барабанная; для индукционных печей: К — канальная, Т — тигельная; для печей сопротивления: Т — тигельная, К — камерная, Б — барабанная. Может добавляться и четвертая (вспомогательная) буква, например буква М, для обозначения миксера. Цифра после буквенного обозначения для большинства плавильных печей означает емкость печи в тоннах.

У термических печей сопротивления вторая основная буква характеризует основной конструктивный признак: А — карусельная; Б — барабанная; В — ванная; Д — с выдвижным подом; К — конвейерная; Н — камерная; Р — рольганговая; Т — толкательная; Ш — шахтная и др. Третья основная буква для этих печей показывает характер среды в печном пространстве: А — азотирующая; З — защитная; О — окислительная (воздух); С — соль, селитра; Ц — цементационная и т. д. После букв следуют размеры рабочего пространства в дециметрах. У всех печей через дробь указывается максимальная температура в сотнях градусов Цельсия (°С). Для агрегатов из нескольких печей обозначение агрегата соответствует обозначению первой печи с добавлением буквы А, знаменатель соответствует температуре последней печи агрегата. К обозначениям печей с камерами охлаждения добавляется буква Х и цифра, определяющая длину камеры в дециметрах.

У индукционных устройств вторая основная буква определяет технологическое назначение: Н — нагревательное; З — закалочное; третья буква характеризует вид нагреваемого изделия или характер нагрева: М — мерные заготовки; П — прутки; У — участковый (местный) нагрев и т. д. После букв ставятся цифры, показывающие мощность устройства в десятках киловатт, и последняя цифра (буква) указывает на частоту тока, например: 1 — 1000 Гц; 8 — 8000 Гц; П — 50 Гц («промышленная» частота).

Примеры обозначений электропечей: СКЗ-4.30.1/9 — конвейерная электропечь сопротивления с защитной атмосферой, размерами рабочего пространства 0,4×3×0,1 м и температурой 900° С; СНО-3.6, 5.2/7 — камерная электропечь сопротивления с воздушной атмосферой, размерами рабочего пространства 0,3×0,65×0,2 м и температурой 700° С; ИЛК-1 — индукционная канальная электропечь для плавки латуни, емкость 1 т; ДСП-1,5 — дуговая сталеплавильная печь с поворотным сводом, емкость 1,5 т.

Электротермические установки, как правило, питаются переменным током (кроме установок вакуумных дуговых печей, для которых необходим постоянный ток). В отношении обеспечения надежности электроснабжения ЭТУ согласно ПУЭ преимущественно принадлежат к электроприемникам 2-й или 3-й категории.

К комплектующему электрооборудованию ЭТУ относятся: печные трансформаторы и автотрансформаторы; преобразовательные агрегаты (для установок печей и электротермических устройств, в которых преобразование электрической энергии в тепловую происходит при частоте, отличной от 50 Гц); коммутационные и защитные аппараты на вводе ЭТУ; токопроводы ЭТУ — силовые электрические цепи, соединяющие печи (электротермические устройства) с другим электрооборудованием; автоматические регуляторы теплового режима печи (устройства); электроприводы вспомогательных механизмов ЭТУ; щиты, пульты и станции управления.

Ниже кратко рассмотрены основные виды ЭТУ (подробнее см. [2, 12, 13, 15, 18—20, 32]).

1-2. УСТАНОВКИ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Конструктивное исполнение печей сопротивления. На конструкцию печей сопротивления существенно влияют характер работы и особенности загрузки и выгрузки нагреваемых материалов, а также температурные условия, наличие или отсутствие искусственной атмосферы в рабочем пространстве печи.

По способу загрузки и характеру работы во времени различают печи периодического (садочные) и непрерывного (методические) действия. В печи периодического действия после загрузки нагреваемое тело не изменяет своего положения в течение всего времени тепловой обработки, т. е. до момента выгрузки. В печи непрерывного действия нагреваемые изделия загружаются с одного конца печи, постепенно перемещаются по ее длине, прогреваясь до заданной температуры, и выдаются с другого конца печи. Такие печи используются, в частности, в автоматических технологических линиях.

На рис. 1-1 схематично показаны некоторые основные типы конструкций термических печей сопротивления: садочных (рис. 1-1, *а—д*) и методических (рис. 1-1, *е—и*).

Камерная печь (рис. 1-1, *а*) среди печей периодического действия является простейшей и в то же время универсальной. Ее корпус *2* прямоугольной формы выполнен в виде камеры с огнеупорной и теплозащитной футеровкой, помещенной в металлический кожух. Печь загружается и выгружается через отверстие в передней стенке, закрываемое дверцей *1*. Малые печи для удобства загрузки устанавливаются на ножках, большие печи — непосредственно на полу. Нагревательные элементы *3* располагаются в поду и на боковых стенках печи, реже на ее своде (у очень крупных печей и на задней стенке печи и на дверце). Подовые нагревательные элементы перекрываются жароупорными плитами, на которых укладываются изделия. Дверцы печей обычно выполняются подъемными, у малых печей — с ручным или ножным приводом, у более крупных — с электроприводом.

Шахтная печь (рис. 1-1, *б*) представляет собой круглую, квадратную или прямоугольную шахту. Корпус печи *2* заглублен в землю и перекрывается сверху крышкой *4* с затвором и электроприводом. Нагревательные элементы *3* подвешиваются на боковых стенках печи. В таких печах производится термообработка, например, длинных валов. Некоторые шахтные печи имеют две—три тепловые зоны для обеспечения равномерности нагрева изделий большой длины.

В *колпаковой печи* (рис. 1-1, *в*) съемный корпус *2* (колпак) цилиндрической или прямоугольной формы с нагревательными элементами *3* на боковых стенках и жароупорный муфель *5* устанавливаются краном. Загрузка помещается также при помощи крана на стенд — под *6* печи (при поднятых колпаке и муфеле). Питание нагревательных элементов осуществляется при помощи гибких кабелей и электрических соединителей (штепсельных разъемов). Обычно одним колпаком обслуживаются несколько стендов. По окончании нагрева колпак отключается и краном переносится на соседний стенд, где уже установлена очередная загрузка. Остывание загрузки происходит под муфелем.

Печь с выдвижным подом (рис. 1-1, *г*) является разновидностью камерной печи. Ее применяют для термообработки и отжига очень крупных изделий. Здесь камера *2* не имеет дна и стоит на колоннах, а выдвижной под *7* смонтирован на тележке с электроприводом катков или с лебедкой. Для загрузки и разгрузки открывается дверца *1* и тележка выезжает из-под камеры. Расположение нагревательных элементов такое же, как и в обычной камерной печи.

Соляная электродная ванна (рис. 1-1, *д*) представляет собой металлическую или керамическую ванну *8*, наполненную солью *10*, в которую опущены электронагре-

ватели (электроды) *11*. Часть ванны, в которой находятся электронагреватели, отделена от рабочей части перегородкой. Ванна помещена в корпус *2* и прикрыта сверху зонтом *9*. Для пуска ванны (разогрева соли) используется специальный погружной электронагреватель. Соляные ванны обеспечивают быстрый и равномерный разогрев изделий, помещаемых в расплавленную соль. Они применяются, в частности, для нагрева под закалку и отпуск инструментов.

Печи непрерывного действия характерны наличием транспортирующего механизма, который может быть выполнен различными способами.

В *толкательной печи* (рис. 1-1, *е*), которая имеет длинную прямоугольную камеру *2* с нагревателями *3*, изделия на поддонах *12* или без них периодически проталкиваются по направляющим или роликам пода печи с помощью находящегося перед загрузочной дверцей *1* механизма толкателя с электро- или гидроприводом. На время проталкивания загрузочная *1* и разгрузочная *1'* дверцы печи открываются. Достоинства толкательной печи в первую очередь определяются надежностью работы, поскольку механизм толкателя находится вне печи, а также возможностью обработки изделий большой массы.

Конвейерная печь (рис. 1-1, *ж*) представляет собой длинную камеру *2* с нагревателями *3* и дверцами *1* и *1'*. Транспортирующий механизм печи — цепной конвейер *13*, бесконечное полотно которого состоит из плетеной металлической сетки или цепных звеньев. Конвейерная цепь натянута между ведущим и ведомым барабанами и приводится в движение электроприводом через передаточный механизм и ведущий барабан. Барабаны могут располагаться внутри печи или вне ее. В первом случае меньше потери тепла, во втором повышается надежность работы печи, упрощается ее загрузка и выгрузка.

Барабанная печь (рис. 1-1, *з*) имеет в камере *2* с нагревателями *3* жароупорный барабан (муфель) *14* с архимедовой спиралью. При вращении барабана с помощью электропривода изделия перекатываются в барабане, постепенно перемещаясь от загрузочного устройства *15* к месту разгрузки. Такие печи применяются, например, для закалки мелких деталей, не имеющих острых кромок. Тогда из разгрузочного конца барабана детали поступают в закалочный бак *16*.

Рольганговая печь (рис. 1-1, *и*) наиболее универсальна. В ее длинной камере *2* с нагревателями *3* и дверцами *1* и *1'* можно обрабатывать изделия разнообразных форм и размеров. В зависимости от размеров и конфигурации изделий последние перемещаются по рольгангу *17* печи непосредственно или в поддонах. Привод рольганга — электромеханический регулируемый, весь механизм привода, кроме роликов, вынесен из печи. Рольганговые печи могут работать в непрерывном и в периодическом режиме; они используются не только для разнообразных операций термообработки, но и для нагрева заготовок перед пластической деформацией. Часто рольганговые печи выполняются с несколькими самостоятельными зонами нагрева и охлаждения (несколько температурных зон могут иметь и другие методические печи). По сравнению с толкательными печами таких же типоразмеров и мощности рольганговые имеют лучшие технико-экономические показатели: производительность

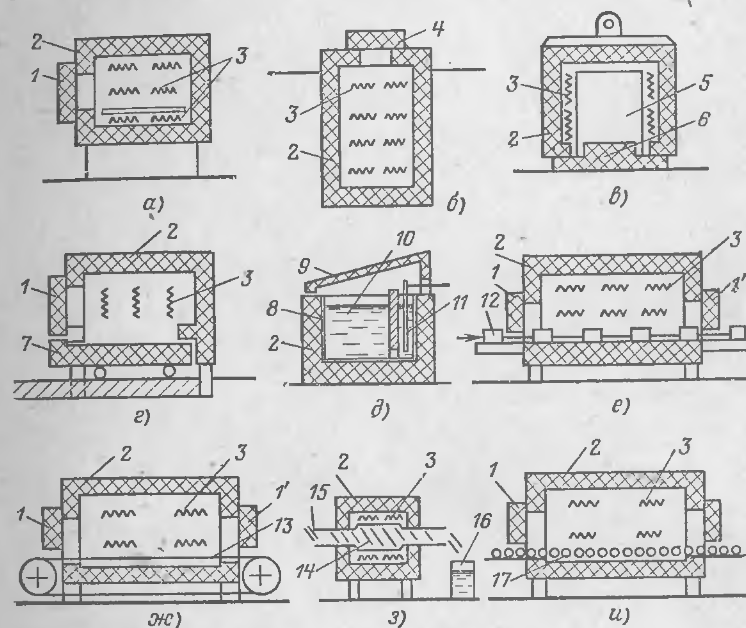


Рис. 1-1. Схемы электропечей сопротивления.

их выше, а удельный расход электроэнергии меньше. Кроме того, сокращается площадь, занимаемая печью, и уменьшается расход конструкционных жаропрочных материалов при изготовлении печи. Рольганговые печи по сравнению с конвейерными более надежны в работе.

Печи непрерывного действия особенно удобны для работы в поточных технологических линиях с металлообрабатывающими станками и другими агрегатами и устройствами.

Плавильные электропечи сопротивления для легкоплавких металлов (олово, цинк и т. п.) представляют собой стальную литую или сварную ванну либо котелок, помещенные в футеровку. Нагревательные элементы обычно укладываются в футеровке. В некоторых случаях трубчатые нагревательные элементы опускаются непосредственно в ванну. Крупные печи снабжаются механизмом наклона для разлива металла. Для плавления алюминия при фасонном литье применяют также камерные печи емкостью до 250 кг, в которых металл расплавляется непосредственно в футеровке ванны.

В ряде процессов термообработки нагрев металлов в воздушной среде нежелателен или даже недопустим из-за окисления металла или его обезуглероживания (у сталей). Для таких процессов применяют электропечи с защитной атмосферой, создаваемой путем введения в рабочее пространство смеси газов (азота и водорода), промышленных газов, естественного или городского газа и др. В конструкциях печей с защитной атмосферой предусматриваются меры по герметизации печи или уменьшению потерь газа. Иногда применяют пламенную завесу, сжигая газ, вытекающий через щель у порогов загрузочного и разгрузочного окон. Некоторые процессы термохимической обработки поверхности изделий, например цементация или азотирование, требуют специальной атмосферы. Печи в этом случае должны быть герметичными, так же как и печи для плавки металлов в вакууме.

По рабочей температуре печи сопротивления разделяют на низкотемпературные (до 600—700° С), среднетемпературные (от 600—700 до 1200—1250° С) и высокотемпературные (от 1250 до 2500° С). Температурные условия также накладывают отпечаток на конструкцию печи, нагревательных элементов, вспомогательных механизмов и на применяемые для них материалы. В низкотемпературных печах, в которых значительная часть тепла передается конвекцией, для улучшения условий нагрева часто применяется принудительная вентиляция печной атмосферы. Некоторые конструкции термических печей сопротивления показаны на рис. 1-2—1-4.

Среднетемпературная серийная камерная печь (рис. 1-2) имеет камеру, образованную огнеупорной фу-

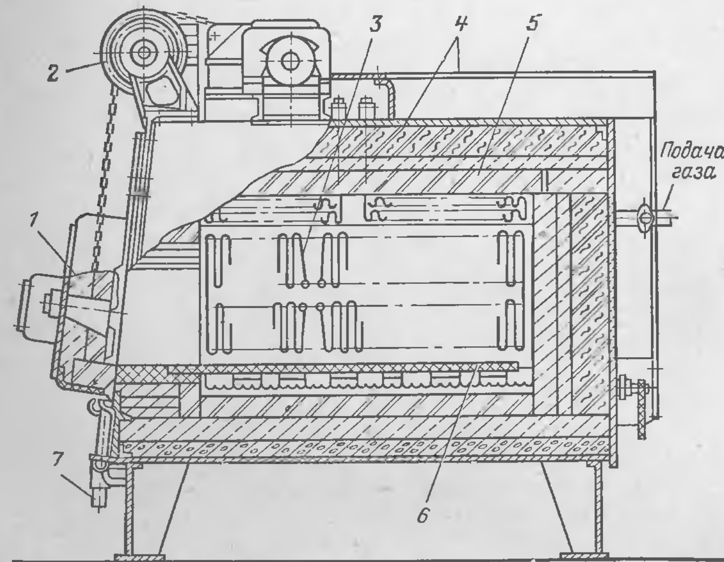


Рис. 1-2. Среднетемпературная камерная печь.

теровкой *5* и теплоизоляцией в кожухе *4* из листовой и профилированной стали. На своде, боковых стенках и в поду расположены нагревательные элементы *3* в виде зигзагов или спиралей. Подовые нагревательные элементы перекрыты жароупорными плитами *6*, на которые укладываются нагреваемые изделия. Дверца *1* печи имеет механизм подъема *2* с электроприводом. Печь снабжена устройством пламенной завесы *7*. В камеру печи подается защитный газ.

На рис. 1-3 показана низкотемпературная конвекционная сушильная печь, широко применяемая для сушки роторов, статоров и якорей электрических машин до и после пропитки кремнийорганическим лаком. В ней мо-

жет производиться также сушка изделий после окраски. Печь обогревается воздухом, проходящим через электрокалорифер *2*, в котором помещены нагревательные элементы, и рассчитана на температуру 200° С. Воздух прогоняется через калорифер вентилятором *3*, нагревается и, омывая изделия, находящиеся в камере печи на тележке *4*, отдает им свое тепло. Охлажденный воздух засасывается тем же вентилятором в циркуляционный воздухопровод *1* через окна, расположенные по нижнему периметру камеры, и вновь поступает в калорифер. Таким образом, печь имеет замкнутый цикл циркуляции воздуха.

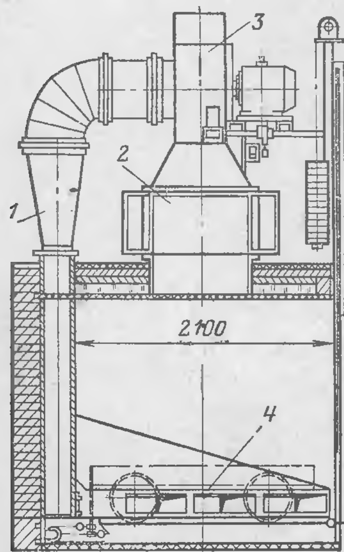


Рис. 1-3. Сушильная камерная печь.

На рис. 1-4 изображена рольганговая печь для совмещенного процесса отжига и оксидирования листов магнитопроводов электрических машин. Печь представляет собой крупный агрегат, состоящий из ряда камер и узлов. Листы статора и ротора набираются на оправки, установленные в поддонах *1*. Поддоны передвигаются по всем камерам при помощи нескольких секций рольгангов *3* со своими электроприводами *8*. В камере обжига *2* при 300—320° С производится удаление остатков масла с поверхности листов после штамповки. Камеры нагрева *4* до 900° С (отжиг) и охлаждения *5* до 650—550° С работают с защитной атмосферой. Охлаждение листов магнитопровода осуществляется воздушными охлаждающими трубами и за счет потерь через облегченную футеровку. Одновременно камера *5* оборудована нагревательными элементами. Камеры нагрева и охлаждения оснащены вентиляторами-мешалками, располагаемыми на секциях свода. В последующей камере охлаждения *6* в воздушной среде до 550—400° С

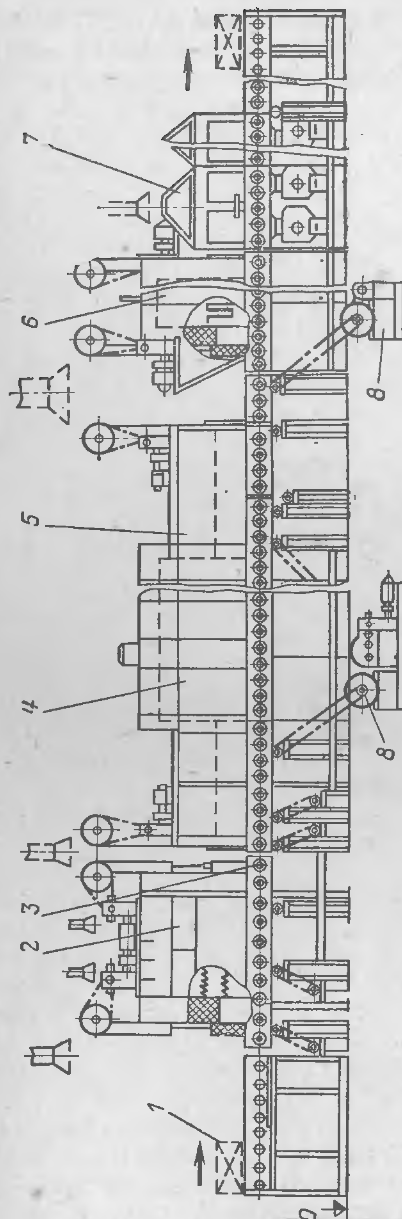


Рис. 1-4. Многокамерная рольганговая печь.

12437/6

Городская
централизованная
библиотечная система
г. Гомель

осуществляется оксидирование листов. Камера также имеет нагревательные элементы и вентиляторы. Охлаждение листов происходит за счет потерь через футеровку. В камере ускоренного охлаждения *7* листы при помощи вентиляторов обдуваются воздухом из цеха, а стенки камеры охлаждаются водой.

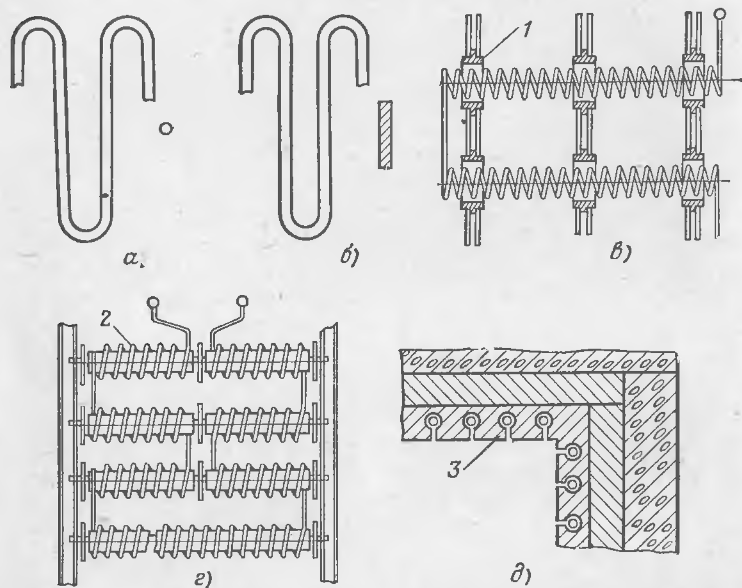


Рис. 1-5. Проволочные и ленточные нагреватели.

Нагревательные элементы (нагреватели). Для электропечей сопротивления нагреватели изготовляются из жаропрочных материалов, стойких к окислению кислородом воздуха при высоких температурах, с высоким удельным электросопротивлением и малым температурным коэффициентом электросопротивления. Они не должны обладать заметным старением, т. е. изменением электрических свойств во времени.

Наибольшее распространение получили проволочные и ленточные нагреватели из хромоникелевых и хромоалюминиевых сплавов, изготовляемые в виде секций. Проволочные нагреватели выполняют зигзагообразными (рис. 1-5, *а*) и спиральными (рис. 1-5, *в—д*), ленточные— зигзагообразными (рис. 1-5, *б*). Проволочные зигзагообразные нагреватели навешивают на стенках и своде печи на жаропрочных крючках, подовые нагреватели укладывают свободно на фасонные кирпичи. Спиральные нагреватели в низкотемпературных печах подвешивают на фасонных керамических втулках *1* (рис. 1-5, *в*), на керамических трубках *2* (рис. 1-5, *г*) или на полочках футеровки. В среднетемпературных печах спиральные нагреватели укладывают также в пазах *3* футеровки (рис. 1-5, *д*). Ленточные нагреватели (изготовленные из ленты или литые) крепят на стенках и своде обычно на специальных керамических крючках; на поду их укладывают на керамических опорах.

Обычно применяют следующие сплавы для проволочных и ленточных нагревателей: железохромоалюминиевые Х13Ю4 — для низкотемпературных печей, ОХ23Ю5А и ОХ27Ю5А — для печей с температурами до 1000 °С; железохромоникелевые (нихромы): Х23Н18, Х25Н20 — для печей с температурами до 1050 °С, Х15Н60 и Х15Н80Т — для печей с температурами до 1150 °С. В табл. 1-1 приведены рекомендуемые температуры нагревателей из этих сплавов. В области, ограниченной рекомендуемыми температурами, срок службы нагревателей составляет не менее 10 000 ч. Под непрерывным режимом в табл. 1-1 подразумевается круглосуточная непрерывная работа (методические печи), под прерывистым — работа с включением и отключением печи не-

Таблица 1-1

Рекомендуемые температуры нагревателей

Материал нагревателя	Рекомендуемая температура, °С, для режима	
	непрерывного	прерывистого
Х20Н80 и Х20Н80Т	1050	1060
Х15Н60	950	900
Х25Н20, Х23Н18	850	800
Х13Ю4	750	650
ОХ23Ю5А	1050	1000
ОХ27Ю5А	1150	1100
Карборунд	1350	1300
Дисилицид молибдена	1550	1500

Примечание. Для металлических нагревателей данные относятся к нагревателям с диаметром проволоки $d=4$ мм или толщиной ленты $a=2$ мм. При $d=7 \div 10$ мм и $a=3$ мм значения температур могут быть увеличены на 50° С.

сколько раз в сутки с существенным остыванием ее в отключенном состоянии.

В печах с электрокалориферами и соляных ваннах (при температурах до 600 °С) часто применяют трубчатые электронагреватели (ТЭН). Нагреватель (рис. 1-6) состоит из металлической трубки *1*, по оси которой расположена нихромовая спираль *2*, приваренная к выводным концам *5* нагревателя. Трубка заполнена кристаллической окисью магния (периклазом) *3*. В концах трубки закреплены выводные изоляторы *4*. Трубка легко изгибается, поэтому ТЭН выпускаются различной формы (в том числе ребристыми — для электрокалориферов).

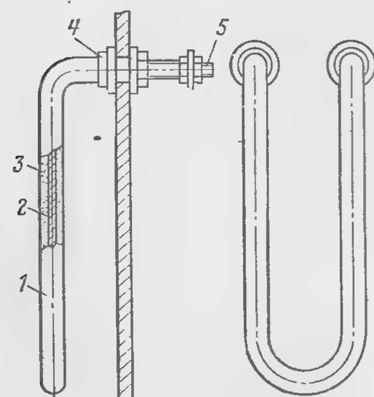


Рис. 1-6. Трубчатый электронагреватель (ТЭН).

Для печей с рабочими температурами выше 1100—1150° С применяют неметаллические нагреватели в виде стержней: карборундовые, основу которых составляет карбид кремния (до 1300—1400 °С), и из дисилицида молибдена (до 1400—1500 °С). Рекомендуемые температуры таких нагревателей указаны в табл. 1-1. Применяют также графитовые и угольные нагреватели (до 2000—2500 °С). Наиболее распространены в высокотемпературных печах нагреватели из молибдена (до 2000 °С в защитной среде) и вольфрама (до 2500 °С в защитной среде).

Электрическая мощность, потребляемая нагревателями, составляет для небольших мощностей единицы киловатт, а для крупных печей может достигать тысячи киловатт и более. Для ориентировки укажем установленные (номинальные) мощности некоторых видов печей сопротивления: от 8 до 160 кВт — камерные печи общего назначения; от 25 до 160 кВт — шахтные печи; от 20 до 1000 кВт — камерные печи для сушки электротехнических изделий; от 10 до 150 кВт — барабанные печи; от 90 до 270 кВт — толкательные печи (от 750 до

1100 кВт — с камерами охлаждения); от 6 до 800 кВт — конвейерные печи (до 1400 кВт — с камерами охлаждения).

Расчет проволочных и ленточных нагревателей имеет целью определить сечение проволоки или ленты, ее суммарную длину и разместить нагревательные элементы (секции) в рабочей камере печи. Рассмотрим упрощенный метод расчета нагревателей для печей, в которых теплопередача осуществляется в основном излучением, т. е. при температуре печи не менее 600—700 °С. При расчете исходят из заданной номинальной электрической мощности печи (или мощности зоны — для многозонных печей) $P_{ном}$ (кВт), конечной температуры нагрева изделий $t_{изд}$ (°С) и площади футеровки печи, на которой разместятся нагреватели.

Сначала выбирают схему включения нагревателей для каждой зоны печи. При питании нагревателей от цеховой трехфазной сети 380 В нагреватели можно соединять в звезду или в треугольник с последовательным или параллельным соединением нагревательных элементов (секций), т. е. с одной или несколькими фазоветвями в каждой фазе. Возможно и однофазное включение нагревателей на фазное напряжение 220 В. В ряде случаев нагреватели питаются от специальных понизительных печных трансформаторов или автотрансформаторов.

После выбора схемы включения известны: мощность на фазоветвь $P_ф$ (кВт); фазное напряжение $U_ф$ (В). Исходя из максимальной температуры изделия $t_{изд}$ (°С), выбирают по табл. 1-1 материал нагревателя и его рекомендуемую температуру $t_{наг}$ (°С). Затем с учетом принятой конструкции нагревательных элементов определяют значение допустимой удельной поверхностной мощности нагревателя $W_{доп}$, которой отвечает срок службы нагревателя не меньший, чем 10 000 ч. Удельная поверхностная мощность — есть мощность, выделяемая с единицы поверхности нагревателя (Вт/м^2). На рис. 1-7 приведены зависимости допустимой удельной поверхностной мощности идеального нагревателя $W_{ид}$ от температуры изделия $t_{изд}$ при различных температурах нагревателя $t_{наг}$. Под идеальным подразумевается сплошной нагреватель, окружающий изделие со всех сторон, при допущении, что тепловые потери через футеровку печи отсутствуют.

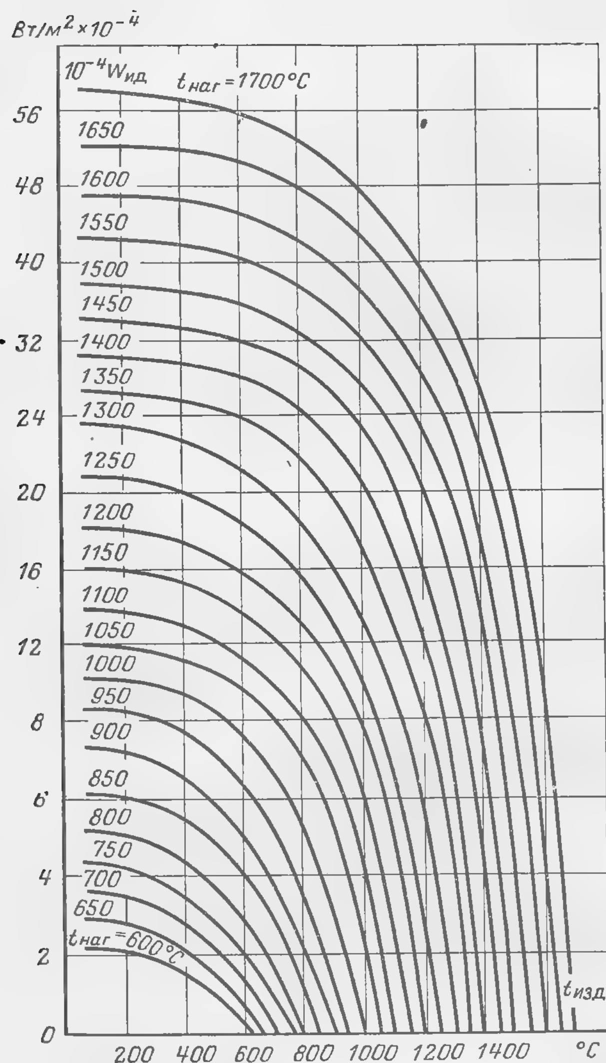


Рис. 1-7. Кривые удельной поверхностной мощности идеального нагревателя.

Реальная допустимая удельная поверхностная мощность нагревателя $W_{доп}$ связана с идеальной мощностью $W_{ид}$ зависимостью

$$W_{доп} = \alpha W_{ид}, \quad (1\text{-}1)$$

где α — поправочный коэффициент, учитывающий тепловые потери мощности в печи.

Рекомендуемые усредненные значения α: для проволочных спиралей на полочках или на трубках 0,2—0,3; для проволочных зигзагов 0,6; для ленточных зигзагов 0,4; для ленточных литых зигзагов 0,6.

Определив по формуле (1-1) значения $W_{доп}$, можно найти расчетные конструктивные размеры нагревателей.

Для проволочного нагревателя диаметр проволоки d, м, и ее длину на фазоветвь $L_ф$, м, рассчитывают по формулам:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P_ф^2 \rho \cdot 10^6}{\pi^2 U_ф^2 W_{доп}}}; \quad (1\text{-}2)$$

$$L_ф = \frac{\pi U_ф^2 d^2}{4P_ф \rho \cdot 10^3}, \quad (1\text{-}3)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление материала нагревателя в горячем состоянии, Ом·м.

Для ленточного нагревателя толщину ленты a, м, и ее длину на фазоветвь $L_ф$, м, находят по формулам:

$$a = \sqrt[3]{\frac{P_ф^2 \rho \cdot 10^6}{2m(m+1) U_ф^2 W_{доп}}}; \quad (1\text{-}4)$$

$$L_ф = \frac{U_ф^2 ma}{P_ф \rho \cdot 10^3}, \quad (1\text{-}5)$$

где $m = b/a$; b — ширина ленты, м.

Обычно для ленточных нагревателей $m = 5 \div 15$ в соответствии с сортаментом выпускаемой ленты. Наиболее распространена лента с $m = 10$.

Остальные конструктивные размеры нагревателей (рис. 1-8) определяют по рекомендуемым соотношениям: диаметр спирали проволочного нагревателя $D = (4 \div 6)d$ — для хромоалюминиевых сплавов, $D = (7 \div 10)d$ — для нихромов; шаг витков спирали $t = (3 \div 5)d$; шаг проволочного зигзага $t \geqslant (5 \div 9)d$, шаг ленточного зигзага $t \geqslant (2 \div 5)b$; высота зигзага $H =$

$=0{,}15 \div 0{,}3$ м — для хромоалюминиевых сплавов, $H=$ $=0{,}2 \div 0{,}4$ м — для нихромов; радиус закругления зигзага $R \geqslant d$ или $R=(4 \div 5)\,a$. Для температур на нагревателе до 1000 °С применяют ленту размером не менее $0{,}001 \times 0{,}01$ м, при более высоких температурах — не менее $0{,}002 \times 0{,}02$ м. Для проволочных спиралей минималь-

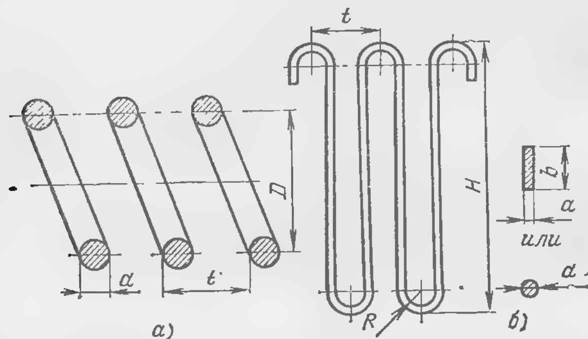


Рис. 1-8. Конструктивные размеры нагревателей.

а — спиральные проволочные нагреватели; *б* — зигзагообразные проволочные и ленточные.

ный диаметр проволоки 0,003 м, для проволочных зигзагов 0,006 м.

При расчете нагревателей можно исходить также из имеющегося сортамента проволоки или ленты. Тогда, зная расчетное сопротивление фазоветви нагревателя $R_ф = U_ф^2/P_ф$ и выбирая по сортаменту проволоку или ленту, находят длину нагревателя на фазоветвь, м:

$$L_ф = \frac{\pi d^2 R_ф}{4\rho} \qquad (1\text{-}6)$$

или

$$L_ф = \frac{abR_ф}{\rho}. \qquad (1\text{-}7)$$

Рассчитанный таким образом нагреватель проверяют на допустимую удельную поверхностную мощность. Определяют фактическую удельную поверхностную мощность нагревателя $W_{наг}$:

для проволочного нагревателя

$$W_{\text{[redacted]}} = \frac{P_ф \cdot 10^3}{\pi d L_ф}; \qquad (1\text{-}8)$$

для ленточного нагревателя

$$W_{наг} = \frac{P_ф \cdot 10^3}{2\,(a+b)\,L_ф}. \qquad (1\text{-}9)$$

Если полученное значение $W_{наг} \leqslant W_{доп}$, то нагреватель выбран правильно. Если $W_{наг} > W_{доп}$, то размер сечения нагревателя при данной схеме соединения нагревателя не подходит. Нужно либо изменить схему соединения, повышая напряжение на фазоветвь, либо уменьшить мощность фазоветви, чтобы при том же сечении получить большую длину, а значит, и площадь поверхности нагревателя.

Пример 1-1. Рассчитать нагреватель для шахтной печи, предназначенной для отжига стальных изделий и работающей при температуре 800° С. Мощность печи 66 кВт, напряжение сети 380 В; печь трехфазная, режим работы близок к непрерывному. Размеры шахты: диаметр 0,8 м, высота 1,2 м.

Принимаем включение нагревателей в звезду с одной ветвью на фазу. Фазная мощность печи $P_ф = 66/3 = 22$ кВт; фазное напряжение $U_ф = 220$ В. Выбираем по табл. 1-1 в качестве материала нагревателей нихром Х15Н60 с рекомендуемой температурой 950° С и удельным сопротивлением $\rho = 1{,}2 \cdot 10^{-6}$ Ом · м. По рис. 1-7 для $t_{изд} = 800°$ С находим для идеального нагревателя $W_{ид} = 3{,}7 \cdot 10^4$ Вт/м². Значение коэффициента эффективности для ленточного зигзага $\alpha = 0{,}4$. Тогда согласно (1-1) допустимая удельная поверхностная мощность для выбранного типа нагревателя

$$W_{доп} = 0{,}4 \cdot 3{,}7 \cdot 10^4 = 1{,}48 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Далее расчет ведем по формулам (1-4) и (1-5), принимая для ленты значение $m=10$.

Толщина ленты

$$a = \sqrt[3]{\frac{22^2 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6}{2 \cdot 10\,(10+1) \cdot 220^2 \cdot 1{,}48 \cdot 10^4}} = 1{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Выбираем ленту размерами $1{,}5 \times 15$ мм.

Длина ленты на фазу

$$L_ф = \frac{220^2 \cdot 10 \cdot 1{,}5^2 \cdot 10^{-6}}{22 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3} = 41{,}25 \text{ м}.$$

Нагреватель фазы выполняем в виде одной секции. Размещаем секции нагревателей трех фаз одну над другой. Принимаем высоту зигзага $H=0{,}25$ м, расстояние между секциями по 0,1 м. Длина секции нагревателя по окружности шахты печи $l_ф = 3{,}14 \cdot 0{,}8 - 0{,}1 = 2{,}4$ м (0,8 м — диаметр шахты, 0,1 м — расстояние между выводами). Длина ленты на шаг зигзага с учетом закруглений: $l_t = 2(H-2R) + 2\pi R = 2H + 2R(\pi - 2)$ — см. рис. 1-8, *б*. Принимаем $R = 5a = 5 \cdot 1{,}5 \times 10^{-3} = 7{,}5 \cdot 10^{-3}$ м, тогда $l_t = 2 \cdot 0{,}25 + 2 \cdot 7{,}5 \cdot 10^{-3}(3{,}14 - 2) \approx 0{,}52$ м. Число зигзагов на фазу $n = L_ф/l_t = 41{,}25 : 0{,}52 \approx 79$. Шаг зигзага $t=$ $=l_ф/n = 2{,}4 : 79 = 0{,}03$ м, т. е. $t=2b$, что приемлемо.

Электрооборудование установок печей сопротивления. Электропечная установка сопротивления имеет следующие основные элементы: а) собственно электропечь; б) вспомогательные механизмы печи с электроприводом (или с гидро- и пневмоприводом), обеспечивающие загрузку и выгрузку нагреваемых изделий и мате-

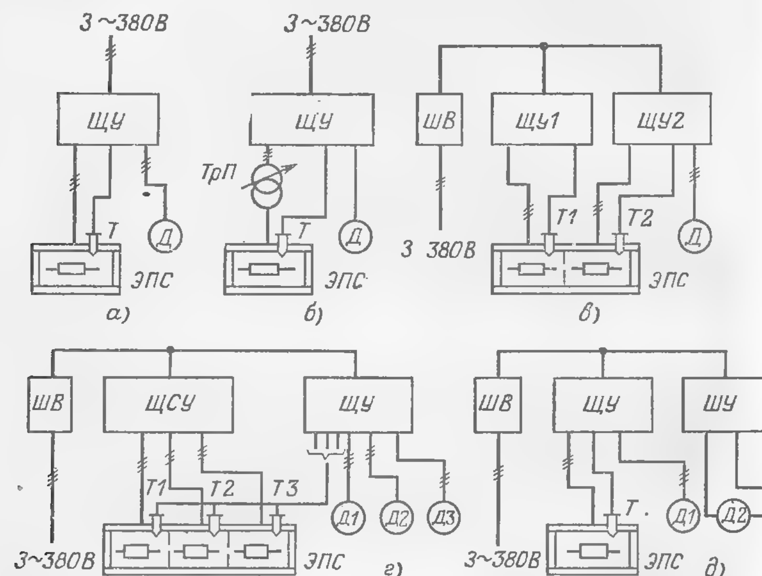


Рис. 1-9. Поясняющие электрические схемы установок печей сопротивления: однозонных (*а*, *б*, *д*), двухзонной (*в*), трехзонной (*г*).

ЭПС — электропечь сопротивления; *ЩУ*, *ЩУ1*, *ЩУ2* — щиты управления; *ТрП* — печной трансформатор или автотрансформатор; *ЩСУ* — щит станций управления; *ШВ* — шкаф станции ввода; *ШУ* — шкаф управления; *Т*, *Т1*, *Т2*, *Т3* — датчики температуры; *Д*, *Д1*, *Д2*, *Д3* — двигатели вспомогательных механизмов. Схемы *в*, *г*, *д* могут иметь элемент *ТрП*.

риалов или перемещение их в рабочем пространстве печи, подачу в печь воздуха или газа; в) комплектующее электрооборудование — трансформатор или автотрансформатор для согласования напряжения питающей сети с напряжением на нагревателях, а в некоторых установках и для регулирования напряжения на нагревателях; щиты, пульты, станции управления для включения и отключения печи, автоматического регулирования температуры, управления приводами и системой подачи газа в печь с защитной или специальной атмосферой, либо

вакуумной системой вакуумных печей; г) датчики систем измерения и автоматического регулирования температуры печи, а также измерения и контроля вакуума или давления газа и других параметров.

Поясняющие принципиальные электрические схемы печных установок приведены на рис. 1-9.

Основным родом тока для питания печей сопротивления служат трех- или однофазный переменный ток частотой 50 Гц, а основное напряжение 380 В (в перспективе 660 В).

Для электроприводов вспомогательных механизмов печей обычно используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Для механизмов, требующих регулирования скорости, применяют двигатели постоянного тока с питанием от магнитных усилителей или тиристорных преобразователей. Мощности двигателей вспомогательных механизмов печей серийного изготовления находятся в пределах 0,6—10 кВт.

Печные трансформаторы и автотрансформаторы используют при напряжении нагревательных элементов, отличающемся от напряжения питающей сети, или при необходимости регулирования напряжения на нагревателях, т. е. мощности, подводимой к нагревателям. Во многих случаях для печей с металлическими нагревательными элементами применение понижающих трансформаторов (автотрансформаторов) экономически выгодно, так как позволяет выбрать нагревательные элементы, имеющие бо́льший срок службы за счет увеличенного сечения проволоки (ленты). Трансформаторы (автотрансформаторы) применяют, как правило, также для печей с нагревательными элементами из дисилицида молибдена или карборунда, сопротивление которых существенно изменяется с их разогревом, и для соляных ванн.

Регулирование вторичного напряжения U_2 печных трансформаторов (автотрансформаторов) осуществляется ступенями. Предусматривается несколько ступеней U_2, причем регулирование производят без нагрузки изменением коэффициента трансформации. Для этого изменяют числа витков секционированной первичной обмотки перестановкой перемычек или специальным переключателем; у некоторых типов трансформаторов дополнительно переключают схему секционированной вторичной обмотки.

Трансформаторы и автотрансформаторы для печей сопротивления, как правило, имеют естественное воздушное охлаждение («сухие») и устанавливаются непосредственно в производственных помещениях поблизости от печей.

Однофазные печные трансформаторы серии ТПО изготовляются на мощности 1,6—10 кВ·А с первичным напряжением 220 В (на максимальные вторичные напряжения $U_{2max} \approx 20 \div 80$ В, с четырьмя ступенями, при этом $U_{2min} \approx 0{,}65 U_{2max}$) и на мощности 25—250 кВ·А с первичным напряжением 380 В (на напряжения $U_{2max} \approx 40 \div \div 160$ В, с восемью ступенями, $U_{2min} \approx 0{,}3 U_{2max}$).

Трехфазные печные трансформаторы серии ТПТ рассчитаны на первичное напряжение 380 В. При мощностях 16—25 кВ·А они имеют 16 ступеней трансформации (4 ступени первичной и дополнительно 4 ступени вторичной обмоток). По ступеням вторичной обмотки напряжение U_2 изменяется в 8 раз ($U_{2max} \approx 70$ В на первой ступени первичной обмотки) и за счет ступеней первичной обмотки — еще в 1,7 раза. Трансформаторы мощностью 40—250 кВ·А изготовляются с восемью ступенями напряжения U_2. При $U_{2max} \approx 270$ В напряжение на последней ступени составляет $0{,}36 U_{2max}$. Кроме того, вторичная обмотка может переключаться со звезды на треугольник.

Печные трехфазные автотрансформаторы серии АПТ мощностью 6—25 кВ·А с первичным напряжением 380 В и 16 ступенями трансформации позволяют регулировать напряжение U_2 в пределах от 250 до 40—50 В.

Применяются также трансформаторы и автотрансформаторы других серий, в том числе и трансформаторы с плавным регулированием вторичного напряжения (с подвижной вторичной обмоткой).

Щиты и станции управления. В установках печей сопротивления широко применяют комплектные электротехнические устройства. В этих устройствах устанавливаются все электрические аппараты и приборы, обеспечивающие включение печей и их работу в соответствии с требованиями технологического процесса. Конструктивно комплектные устройства оформлены в виде щитов, станций, блоков и пультов управления и размещаются вблизи печей.

Щит управления (рис. 1-10) представляет собой шкаф *1* с коммутационной и контрольно-регулирующей

аппаратурой для дистанционного включения нагревателей и электроприводов одного-двух вспомогательных механизмов, контроля и регулирования температуры однозонной печи или одной тепловой зоны многозонной печи (см. схемы на рис. 1-9, *а—в*). Силовая часть щита содержит автоматический выключатель *9* для защиты нагревателей и печных трансформаторов или автотрансформа-

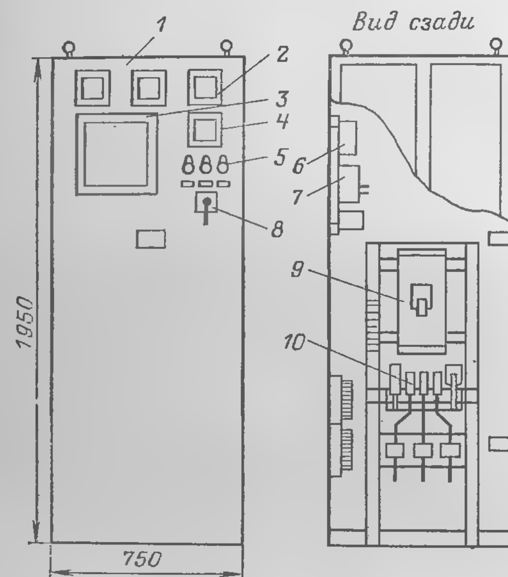


Рис. 1-10. Щит управления типа ИЗРП.

торов от коротких замыканий и возможных перегрузок и контактор *10* для оперативного включения и отключения нагревателей. В эту же часть входят автоматические выключатели и контакторы электроприводов. К контрольно-регулирующей части щита относятся: прибор теплового контроля (ПТК) *3*, промежуточные реле *6*, переключатель *8* для выбора режима работы нагревателей (автоматического или ручного), автоматический выключатель *7* для защиты цепей управления, а также электроизмерительные приборы *2*, *4* и сигнальные лампы *5*.

Наибольшее распространение получили щиты управления типов ИЗР и ИЗРП. В условном обозначении щи-

тов буква И указывает на измерение температуры, буква З означает наличие прибора записи температуры (при его отсутствии буквы З в обозначении нет), буква Р отражает применение регулирования температуры, буква П ставится при наличии приборов контроля тока и напряжения. Следующие за буквами три цифры означают: первая (2) — двухпозиционное регулирование; вторая (1—8) — номер модификации по типу ПТК; третья (1—4) — исполнение щита по значению тока в силовой цепи. Следующие за цифрами буквы обозначают варианты исполнения щита: Э — с аппаратурой для включения нереверсивного двигателя; Р — то же для реверсивного двигателя; Д — то же для двух двигателей — реверсивного и нереверсивного; Г — с аппаратурой для работы печи с газовой атмосферой. Щиты могут иметь исполнение вариантов Э, Р, Д в сочетании с вариантом Г.

В установках крупных печей с большим числом зон используют комплектные станции управления, в которых размещается только коммутационная аппаратура для включения нагревателей (на две или три зоны). Аппаратура станции управления может быть смонтирована на открытых панелях или в шкафах. Несколько станций образуют общий узел, называемый щитом станций управления. Дополнительно устанавливают (на панели или в шкафу) общую станцию ввода с автоматическим выключателем и измерительными приборами. Вся контрольно-регулирующая аппаратура и аппараты включения и управления электроприводов размещаются в этих случаях в отдельном щите управления (см. схему на рис. 1-9,*г*). При большом числе электроприводов вся аппаратура управления ими размещается в так называемых пультах управления.

Станции ввода применяют иногда и для установок с несколькими щитами управления (см. схему на рис. 1-9,*в*). На рис. 1-9,*д* показана схема установки, в которой аппаратура управления вспомогательным регулируемым электроприводом постоянного тока помещена в отдельном шкафу *ШУ*.

Электрические схемы установок печей сопротивления. Благодаря применению в установках электропечей сопротивления комплектных щитов и станций управления принципиальные электрические схемы установок различных печей состоят из повторяющихся типовых узлов и отличаются друг от друга главным образом в той части,

которая относится к управлению электроприводами вспомогательных механизмов.

В качестве примера рассмотрим упрощенную принципиальную электрическую схему установки однозонной камерной печи (рис. 1-11). Нагреватели печи *ЭПС* получают питание через автотрансформатор *АТ* от сети

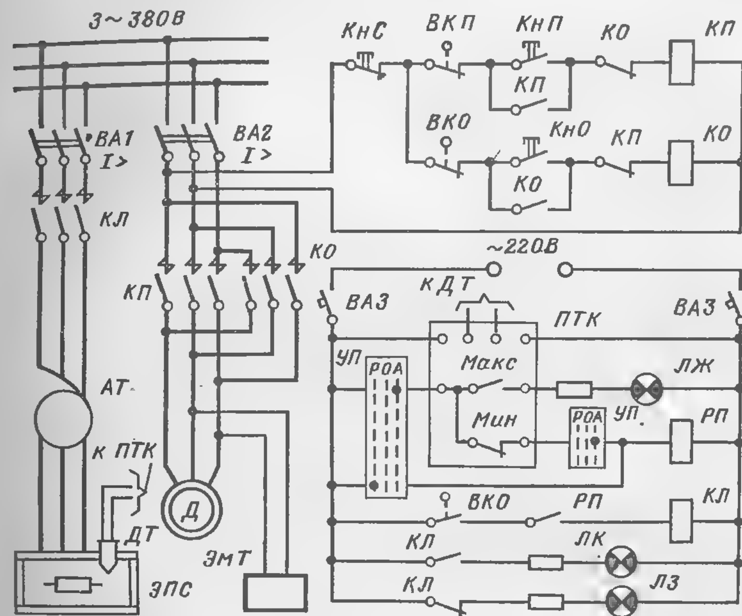


Рис. 1-11. Электрическая схема установки печи сопротивления.

380 В. Включение и отключение нагревателей производится контактором *КЛ*. Силовые цепи защищены автоматическим выключателем *ВА1*.

Реверсивный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором *Д* для механизма подъема и опускания дверцы печи включается контакторами *КП* (подъем) и *КО* (опускание). В отключенном состоянии двигатель *Д* затормаживается механическим тормозом, снабженным электромагнитом *ЭмТ*. Автоматический выключатель *ВА2* служит для защиты двигателя *Д* и его цепи управления. Конечные выключатели *ВКП* и *ВКО* контролируют верхнее и нижнее положения дверцы: размыкающий кон-

такт *ВКП* открывается в верхнем положении, размыкающий контакт *ВКО* — в нижнем. Управление приводом дверцы — ручное дистанционное, при помощи кнопок *КнП* (подъем), *КнО* (опускание), *КнС* (стоп).

Схема цепей управления и сигнализации питается напряжением 220 В и содержит: автоматический выключатель *ВАЗ;* прибор теплового контроля *ПТК* (с датчиком температуры печи *ДТ);* катушки контактора *КЛ* и промежуточного реле *РП;* сигнальные лампы *ЛЗ* (зеленая), *ЛК* (красная) и *ЛЖ* (желтая). Схема обеспечивает ручное дистанционное и автоматическое управление тепловым процессом печи. Выбор вида управления осуществляется универсальным переключателем *УП* на три положения.

При нейтральном положении *0* рукоятки *УП* нагреватели печи отключены, горит лампа *ЛЗ*.

При ручном управлении рукоятка *УП* становится в положение *Р*, включается реле *РП* и своим контактом замыкает цепь катушки контактора *КЛ*. Контактор включается, подавая питание на нагреватели, лампа *ЛЗ* гаснет, лампа *ЛК* загорается. Очевидно, что включение контактора *КЛ* возможно только при закрытой (опущенной) дверце печи. Такая блокировка осуществлена замыкающим контактом конечного выключателя *ВКО*. В режиме ручного управления прибор теплового контроля *ПТК* не оказывает влияния на ход теплового процесса. Он лишь дает оператору информацию о температуре печи.

При автоматическом управлении рукоятка *УП* ставится в положение *А*. Теперь сигнал на включение и отключение реле *РП*, а следовательно, и на включение и отключение нагревателей выдается прибором *ПТК*. Реле *РП* включается, если замкнут контакт *Мин* этого прибора, и отключается при размыкании контакта *Мин* (подробнее о работе *ПТК* см. ниже). Если температура печи по каким-то причинам превысит максимально допустимую, замкнется контакт *Макс ПТК* и загорится лампа *ЛЖ*, привлекая внимание обслуживающего персонала.

Для печей, работающих с газовой атмосферой, в схему цепей управления вводятся дополнительные узлы, обеспечивающие управление аппаратурой газовой атмосферы и сигнализацию о ее работе (световую и звуковую).

Автоматическое регулирование печей сопротивления. Механизация и автоматизация работы термических электропечей, повышение их производительности осуществляются по трем основным направлениям: 1) механизация загрузки и выгрузки печей; 2) автоматическое управление вспомогательными механизмами печи; 3) автоматическое регулирование теплового режима печи.

Регулирование температуры печи достигается ступенчатым или плавным изменением электрической мощности, подводимой к печи. При ступенчатом регулировании используют: переключение нагревателей в трехфаз-

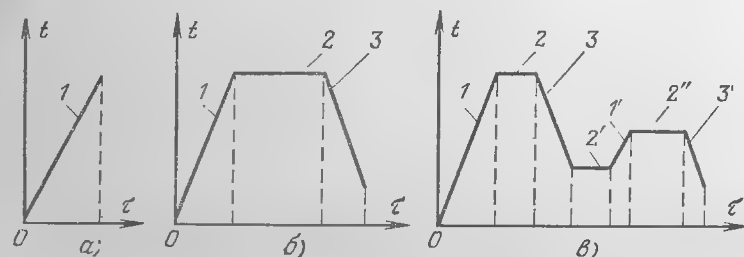


Рис. 1-12. Графики изменения температуры печи во времени.

ных печах с треугольника на звезду с уменьшением мощности в 3 раза; применение регулировочного трансформатора (автотрансформатора); периодическое включение и отключение нагревателей — двухпозиционное регулирование. Последний способ стал самым распространенным как наиболее простой и в то же время позволяющий автоматизировать процесс регулирования. При плавном (непрерывном) регулировании мощности используют тиристорные регуляторы напряжения — управляемые источники питания нагревателей печи. Их применение дает очень высокое качество автоматического регулирования.

Основная задача устройства автоматического регулирования температуры печи *t* состоит в обеспечении заданного температурного режима нагрева во времени τ. В соответствии с технологическим процессом требования к характеру режима и точности его выполнения могут изменяться в широких пределах. В одних случаях нужно лишь нагреть изделие (рис. 1-12, *а*), в других за нагревом (прямая *1*) следует режим выдержки (прямая *2*) и охлаждения (прямая *3*, рис. 1-12,*б*), в третьих необходимо программное регулирование, т. е. изменение температуры печи по заранее заданному закону (рис. 1-12,*в*).

3—612

Устройство автоматического регулирования (регулятор) температуры состоит из датчика действительной температуры печи (ДТ), задатчика требуемой температуры (ЗТ), измерительной части (ИЧ), регулирующего (РЭ) и исполнительного (ИЭ) элементов. В регуляторах общего назначения, осуществляющих двухпозиционное регулирование, функции ЗТ, ИЧ и РЭ совмещены в одном приборе теплового контроля (ПТК). Исполнительным элементом регулятора является контактор включения нагревателей. Датчиком температуры чаще всего служит термоэлектрический термометр (термопара), например, типов ТХК для температур до 600° С, ТХА до 1000° С, ТПР до 1600° С.

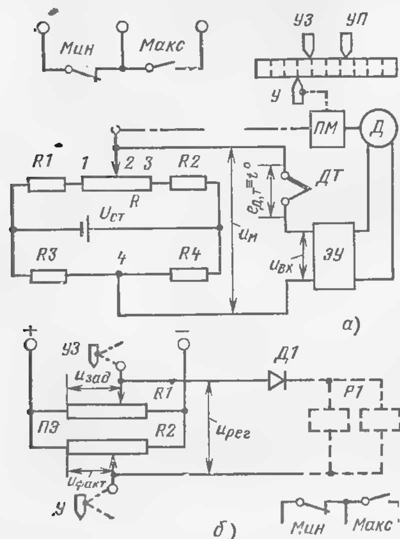


Рис. 1-13. Электрическая схема прибора теплового контроля.

На рис. 1-13,*а* изображена упрощенная электрическая схема одного из наиболее распространенных типов ПТК. Его измерительная часть построена на принципе компенсационного метода измерения ЭДС малой величины, возникающей на выходе датчика *ДТ*, термоэлектродная часть которого (собственно термопара) введена в рабочее пространство печи. Электродвижущая сила датчика температуры $e_{д,т}$, пропорциональная температуре печи, включена последовательно со входом электронного усилителя *ЭУ* в диагональ моста. Два плеча моста образованы постоянными резисторами *R3* и *R4*; третье плечо состоит из постоянного резистора *R1* и части *1—2* потенциометра *R*, четвертое плечо — из постоянного резистора *R2* и остальной части *2—3* потенциометра *R*. В другую диагональ моста включен источник стабилизированного напряжения $U_{ст}$.

Так как сопротивления *R1* — *R4* неизменны, то напряжение $u_м$ на диагонали моста между точками *2* и *4* однозначно определяется положением ползунка потенциометра *R*. Поэтому всегда можно найти такое положение ползунка *R*, при котором напряжение на входе *ЭУ* $u_{вх}=u_м-e_{д,т}=0$ (режим полной компенсации). В рассматриваемом ПТК компенсация осуществляется автоматически. Для этого на выход *ЭУ* (который имеет очень высокий коэффициент усиления — до 100 000 и более) подключен маломощный реверсивный электродвигатель *Д*. При $u_{вх}\neq0$ двигатель перемещает через передаточный механизм *ПМ* ползунок потенциометра *R* в ту или другую сторону в зависимости от знака $u_{вх}$ до положения полной компенсации. В этом положении двигатель останавливается. С ползунком потенциометра *R* механически связаны указатель температуры *У*, перемещающийся вдоль шкалы, градуированной в градусах Цельсия (° С), а также перо, записывающее эту температуру на бумажную ленту. Лента перемещается с постоянной скоростью с помощью лентопротяжного механизма, приводимого в движение отдельным синхронным двигателем.

В описанном исполнении ПТК используется только для показания и регистрации температуры. Для обеспечения работы ПТК как автоматического регулятора в нем устанавливаются дополнительные устройства.

При двухпозиционном регулировании в ПТК устанавливается задающий элемент (ЗТ) — указатель *УЗ* заданной температуры $t_{уст}$ (температуры уставки), на котором укреплен контактный узел с размыкающим контактом *Мин* (рис. 1-13,*а*). Этот контакт будет замкнут до тех пор, пока действительная температура печи *t* остается меньше $t_{уст}$. При $t=t_{уст}$ упор, закрепленный на указателе *У*, воздействует на контактный узел указателя *УЗ*, контакт *Мин* размыкается и при $t>t_{уст}$ сохраняет разомкнутое состояние. Контакт *Мин* вместе с упором на указателе *У* образуют регулирующий элемент (РЭ). Размыкание контакта *Мин* приводит к отключению нагревателей печи (как было показано при описании работы схемы на рис. 1-11). После того как температура печи снизится до $t=t_{уст}$, упор на указателе *У* вернет контакт *Мин* в замкнутое состояние, нагреватели печи вновь будут включены.

Аналогичным контактным узлом, но с замыкающим контактом *Макс*, снабжен дополнительный указатель предельно-допустимой температуры *УП*. Контакт *Макс* замкнется, если указатель *У* достигнет положения указателя *УП*. В схеме управления печи (см. рис. 1-11) загорится сигнальная лампа *ЛЖ*.

Процесс работы регулятора иллюстрирует график на рис. 1-14. Включение печи происходит в момент времени

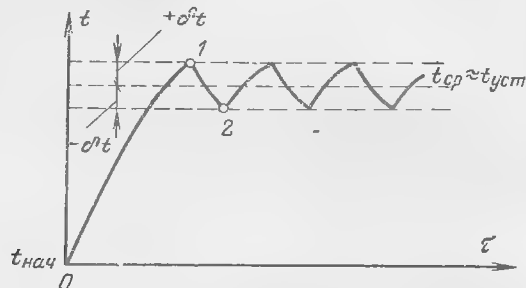


Рис. 1-14. Процесс двухпозиционного регулирования температуры.

$\tau=0$. При этом рабочее пространство печи имело температуру $t_{нач}$, с которой начинается нагрев. Так как контактный узел ПТК обладает зоной нечувствительности $\pm\delta t$, фактическое размыкание контакта *Мин* и отключение нагревателей печи совершается не при $t=t_{уст}$, а при несколько более высокой температуре $t_{уст}+\delta t$ в точке *1*. Далее температура постепенно снижается до значения $t_{уст}-\delta t$, когда в точке *2* замкнется контакт *Мин*. Вновь включаются нагреватели, температура опять будет расти и т. д. Таким образом, благодаря действию автоматического регулятора фактическая температура колеблется около ее среднего значения $t_{ср}$, которое в первом приближении равно $t_{уст}$. Очевидно, что чем меньше зона нечувствительности регулятора $\pm\delta t$, тем меньшими будут и мгновенные отклонения температуры от значения $t_{уст}$.

Вместо контактных задающего (ЗЭ) и регулирующего (РЭ) элементов можно применить потенциометрический элемент (ПЭ) с двумя потенциометрами *R1* и *R2* (см. рис. 1-13,*б*). Потенциометр *R1* — задающий, питается стабилизированным напряжением постоянного тока. Его ползунок механически связан с указателем *УЗ*, а ползунок

2 потенциометра *R2* — с указателем *У*. Напряжения на *R1* и *R2* пропорциональны температурам: $u_{зад}\equiv t_{уст}$ и $u_{факт}\equiv t$. Следовательно, разность напряжений $u_{рег}=u_{зад}-u_{факт}$ пропорциональна разности температур $\Delta t=t_{уст}-t$. При двухпозиционном регулировании на напряжение $u_{рег}$ через диод *Д1* подключаются два маломощных реле *Р1* с контактами *Мин* и *Макс*. Работа автоматического регулятора принципиально протекает так же, как и при использовании контактного варианта элементов *ЗЭ* и *РЭ*. Зона нечувствительности $\pm\delta t$ в данном случае определяется коэффициентом возврата реле *Р1*.

Двухпозиционные регуляторы обеспечивают точность поддержания заданной температуры не ниже $\pm1\%$ по среднему значению $t_{уст}$.

При непрерывном регулировании используется ПТК с потенциометрическим элементом *ПЭ*, а вместо контактора в качестве исполнительного элемента устройства автоматического регулирования температуры применяется тиристорный регулятор напряжения (однофазный типа РНТО или трехфазный типа РНТТ).

Принципиальная схема устройства непрерывного автоматического регулирования температуры печи показана на рис. 1-15. Трехфазный тиристорный регулятор напряжения *ТРН* состоит из шести тиристоров, включенных по два встречно-параллельно в каждую фазу печи, и блока управления тиристорами *БУТ*. Напряжение на входе блока *БУТ* равно выходному (регулирующему) напряжению $u_{рег}$ элемента *ПЭ*. В свою очередь, действующее значение напряжения на выходе *ТРН*, т. е. на нагревателях печи, может плавно изменяться от 0 до 380 В при изменении сигнала $u_{рег}$ от 0 до некоторого значения $u_{рег,\,max}$. Ранее было показано, что напряжение $u_{рег}$ пропорционально разности заданной и фактической температуры печи $\Delta t=t_{уст}-t$. Чем большей будет эта разность, тем больше окажется напряжение на нагревателях и выделяемая ими мощность, следовательно, тем выше становится t, стремясь к значению, лишь немного отличающемуся от $t_{уст}$.

В первом приближении можно принять, что температура t пропорциональна $u_{рег}$, т. е.

$$t=k_1\,u_{рег}, \tag{1-10}$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности, зависящий в первую очередь от коэффициента усиления *ТРН*.

С другой стороны,

$$u_{рег}=k_2\,(t_{уст}-t), \tag{1-11}$$

где k_2 — коэффициент передачи ПТК.

Из выражений (1-10) и (1-11) получим:

$$t=\frac{k_1\,k_2\,t_{уст}}{1+k_1\,k_2}. \tag{1-12}$$

Таким образом, при достаточно большом k_2 температура $t \approx t_{уст}$.

Применение тиристорных регуляторов для промышленных электропечей становится все более широким. Однако в каждом конкретном случае оно должно быть обосновано технико-экономическим расчетом. Отметим также, что ПТК с потенциометрическим элементом (ПЭ) используются и при программном управлении, т. е. когда задается сложный закон изменения температуры печи (например, по графику на рис. 1-12, *в*). В этих случаях сигнал задания $u_з \equiv t_з$ поступает в ПТК от программного устройства.

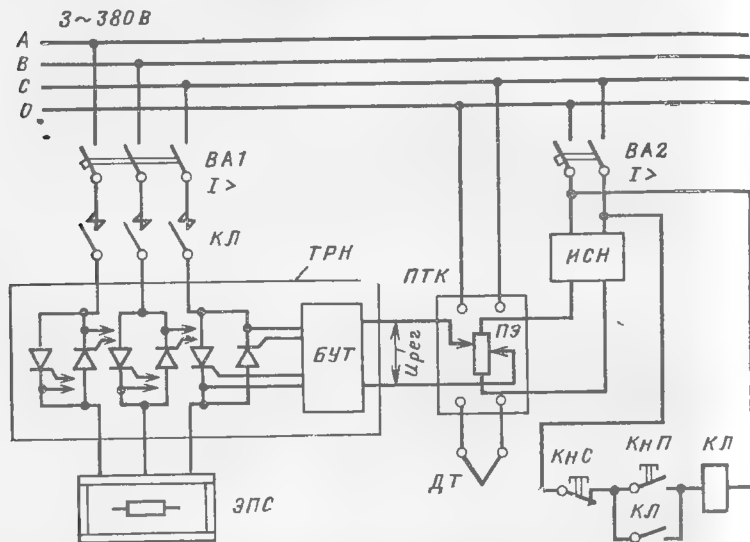


Рис. 1-15. Электрическая схема непрерывного регулирования температуры печи сопротивления.

Рассмотренные принципы устройства и действия ПТК для позиционного и непрерывного регулирования реализованы, в частности, в выпускаемых промышленностью модификациях приборов серии КСП. Эти приборы общего назначения часто называют автоматическими регулирующими компенсаторами.

Автоматический регулятор температуры и печь, как объект регулирования, представляют собой замкнутую систему автоматического регулирования с обратной связью по температуре печи. При двухпозиционном (релейном) регулировании такую систему называют релейной, а при непрерывном регулировании — непрерывной системой.

Установки прямого нагрева. Электротермические устройства прямого нагрева применяются, в частности, для нагрева заготовок при ковке и штамповке. Они обеспечивают быстрый и равномерный нагрев до 1100—1200° С, но потребляют очень большие токи (сотни и тысячи ампер) при относительно малых напряжениях (5—20 В). Устройство прямого нагрева питается от однофазного

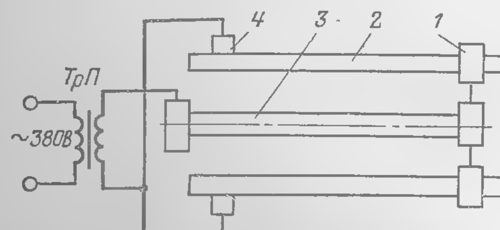


Рис. 1-16. Схема установки прямого нагрева.

печного трансформатора *ТрП* (рис. 1-16). Нагреваемая заготовка *3* зажимается в контактных головках *1*, к которым через токосъемники *4* и токоведущие трубошины *2* подведено напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Установки инфракрасного нагрева. В этих установках нагрев производится в сушильной камере при помощи специальных электроламп или трубчатых нагревательных элементов (ТЭН), которые испускают в основном инфракрасные лучи. В электромашиностроении такие установки применяют для сушки лакокрасочных покрытий и изоляции обмоток электрических машин после пропитки. Этот способ нагрева дает ускорение процесса сушки обмоток за счет проникновения в обмотки тепла также от металлических частей, прогреваемых инфракрасными лучами.

1-3. УСТАНОВКИ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ

Конструктивное исполнение дуговых печей. Упрощенные схемы конструкций двух основных разновидностей дуговых печей прямого и косвенного нагрева показаны на рис. 1-17 и 1-18.

Печь прямого нагрева (рис. 1-17) — трехфазная; ее основное назначение — выплавка стали, в первую оче-

редь высоколегированных сортов, из металлического лома (скрапа). Сварной металлический кожух *1* печи состоит из днища, обычно сфероконической формы, и стенки, выполняемой в виде цилиндра или комбинации

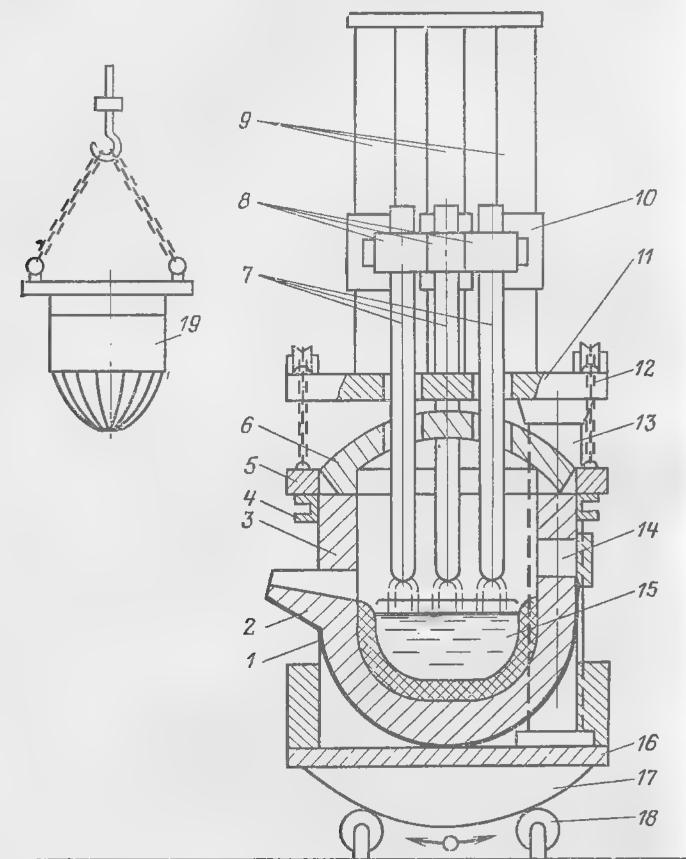


Рис. 1-17. Схема дуговой печи прямого нагрева.

цилиндра и усеченного конуса. Верхняя часть кожуха усилена кольцом жесткости *4* (например, из швеллера). Внутри кожух имеет футеровку *3*, которая образована слоем теплоизоляции и слоем кирпичной огнеупорной кладки. На под печи дополнительно укладывается непроницаемый для расплавленного металла *15* набивной

слой из смеси огнеупорного порошка с жидким стеклом или смолой. Слив металла производится через выпускное отверстие и желоб *2*. На противоположной желобу стороне находится рабочее окно *14*, закрываемое дверцей. Рабочее окно предназначено для наблюдения за

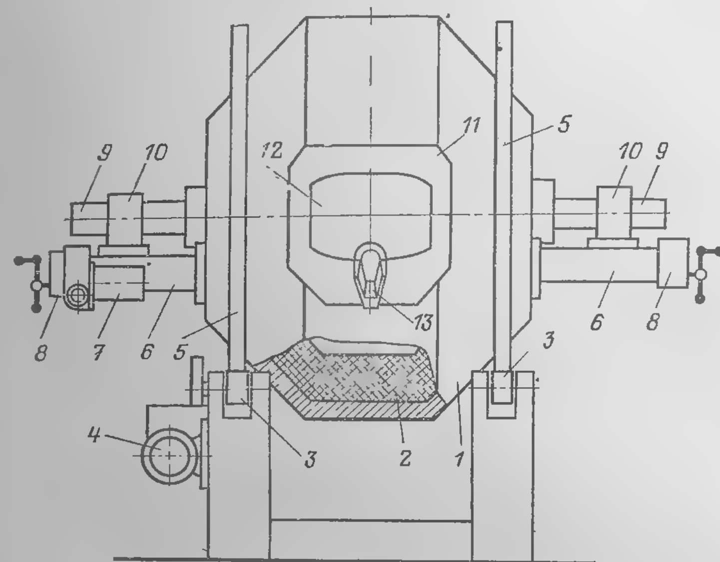


Рис. 1-18. Схема дуговой печи косвенного нагрева.

процессом плавки и выполнения необходимых операций в ходе плавки. Свод *6* печи служит для предотвращения утечки газов и тепла. Он выложен из огнеупорных кирпичей и крепится в сводовом кольце *5* из швеллера или корытообразного сварного профиля. Электроды *7* — угольные или графитированные стержни большого сечения — проходят вертикально через отверстия в своде и укреплены в электрододержателях *8*, к которым подводится ток гибкими кабелями. Благодаря экранирующему действию электродов свод печи частично защищен от непосредственного излучения дуги. Это и дает возможность проводить процессы плавки стали, требующие высоких рабочих температур (1600° С и выше).

Каждый электрододержатель укреплен на трубе или коробчатой балке, соединенной с кареткой *10*, которая

может перемещаться в вертикальном направлении по стойке *9* при помощи механизма перемещения электрода с электро- или гидроприводом. Три стойки *9* установлены на площадке *11*, к которой на цепях *12* подвешено сводовое кольцо *5*. Свод может подниматься, для чего имеется механизм, воздействующий на цепи *12* и снабженный обычно электроприводом. Площадка *11* в свою очередь установлена на опорной стойке *13* (конструктивно узел *11—13* выполняется иначе, например в виде полупортала). Для наклона печи на угол 45° при сливе металла предназначен механизм наклона. Этот механизм конструктивно может быть выполнен по-разному. В наиболее распространенном варианте кожух *1* и узел *11—13* установлены на платформе — люльке *16*, снабженной двумя опорными сегментами *17*, перекатывающимися по роликам *18* или по плоским балкам. Наклон люльки осуществляется реечным или винтовым устройством с электроприводом или с помощью гидропривода. Механизм обеспечивает также наклон печи на 10—15° в сторону рабочего окна для скачивания шлака в процессе плавки.

Разновидности конструкций печей определяются, в частности, способом загрузки в них подготовленного для загрузки материала — шихты. Способ загрузки через рабочее окно используется в настоящее время лишь для малых печей с ручной загрузкой. Наиболее распространены печи с механизированной загрузкой сверху посредством специальной корзины *19* (рис. 1-17), перемещаемой мостовым краном. Корзина снабжена раскрывающимся дном.

Для загрузки сверху большинство печей имеет поворотный свод (печи серии ДСП). Перед загрузкой свод приподнимается на цепях и вместе с площадкой *11* и стойками *9* с помощью механизма поворота свода с электро- или гидроприводом отводится в сторону слива на угол 80—100°, открывая печь. Предварительно поднимают все электроды. Применяются также печи с выкатывающейся ванной, в которых после подъема свода кожух, установленный на тележке, выкатывается под загрузку.

Печи с номинальной емкостью[1] 12 т и более могут иметь механизм вращения ванны в пределах угла ±40° вокруг вертикальной оси. Механизм снабжен обычно электроприводом.

Дуговые сталеплавильные печи емкостью до 10 т. применяют в литейных цехах предприятий при производстве фасонного стального литья. В ряде случаев для этой цели используют и более крупные печи.

Печь косвенного нагрева (рис. 1-18) выполняется однофазной и служит для плавки металлов с температурой плавления не выше 1300—1400° С. В основном такие печи применяют с целью переплава цветных металлов и сплавов, а также чугуна для фасонного литья в небольших литейных цехах. В печи косвенного нагрева очаг высокой температуры (дуга) находится на некотором расстоянии от поверхности металла, поэтому угар и испарение металла намного меньше, чем в печах прямого дугового нагрева. Кожух печи *1* с футеровкой *2* из теплоизоляционного и огнеупорного слоев имеет бочкообразную (как на рисунке) или цилиндрическую форму, расположен горизонтально и уложен опоясывающими его ободьями *5* на четыре роликовые опоры *3*. В средней части кожуха расположено рабочее окно, обрамленное литой рамой *11* и служащее для загрузки печи и слива металла. В нижней части рама образует носок *13* для слива. Окно имеет дверцу *12*, футерованную с внутренней стороны.

Графитированные электроды *9*, между которыми горит дуга, расположены по оси печи и проходят через отверстия в торцах кожуха. Электроды зажаты в электрододержателях *10*, к которым подводится ток гибкими кабелями. Электрододержатели установлены на каретках, которые могут двигаться по направляющим консолей *6*, прикрепленных к кожуху. Подача электродов осуществляется с помощью двух механизмов перемещения *8* вручную или электродвигателем *7* (в схеме на рисунке правый электрод перемещается только вручную). Печь после расплавления части шихты работает с непрерывным качанием на опорных роликах *3*, одна пара которых имеет привод от реверсивного двигателя *4*. Качания печи необходимы в первую очередь для более равномерного нагрева футеровки печи, что повышает срок ее службы. Благодаря качаниям печи нагретые прямым излучением дуги части футеровки периодически омываются и охлаждаются расплавленным металлом,

[1] Емкость печи — количество металла, которое печь выдает за плавку, т. е. которое единовременно можно разместить в плавильном пространстве печи.

более холодным, чем футеровка. Одновременно улучшается качество металла за счет его перемешивания.

Дуговые печи с косвенным нагревом имеют емкость не более 500 кг (например, печь типа ДМБ-0,5 — медеплавильная барабанная емкостью 0,5 т).

Электрооборудование установок дуговых печей. Установка дуговой печи включает в свой состав, кроме собственно печи и ее механизмов с электро- или гидроприводом, также комплектующее электрооборудование: печной трансформатор; токопроводы от трансформатора к электродам печи — так называемую короткую сеть; распределительное устройство (РУ) на стороне высшего напряжения трансформатора с печными выключателями; регулятор мощности; щиты и пульты управления, контроля и сигнализации; программирующее устройство для управления режимом работы печи и др.

Установки дуговых печей — крупные потребители электроэнергии; их единичные мощности измеряются тысячами и десятками тысяч киловатт. Расход электроэнергии на расплавление тонны твердой завалки достигает 400—600 кВт·ч. Поэтому питание печей производится от сетей 6, 10 и 35 кВ через понизительные печные трансформаторы (максимальные значения вторичного линейного напряжения трансформаторов лежат обычно в пределах до 320 В у печей малой и средней емкости и до 510 В у крупных печей). В этой связи для установок печей характерно наличие специальной печной подстанции с трансформатором и РУ; в новых установках применяются шкафы комплектных распределительных устройств (КРУ), выполненных по унифицированным схемам. Печные подстанции располагают в непосредственной близости от печей. Щиты и пульты управления для установок ДСП емкостью до 12 т и ДМБ размещают в пределах печной подстанции с обслуживанием пультов из цеха (с рабочей площадки). Для более крупных печей могут предусматриваться отдельные пультовые помещения с удобным обзором рабочих окон печей.

В электроприводах механизмов печи применяют обычно асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором напряжением 380 В на мощности от 1—2 кВт в небольших печах до 20—30 кВт в более крупных печах. Двигатели приводов перемещения электродов — постоянного тока с питанием от электромашинных или магнитных усилителей, а также от тиристорных преобразователей. Эти приводы входят в состав самостоятельного агрегата — регулятора мощности печи.

В печах емкостью более 20 т с целью увеличения производительности и облегчения труда сталеваров предусматриваются устройства для перемешивания жидкой ванны металла, основанные на принципе бегущего магнитного поля. Под днищем печи из немагнитного материала размещается статор с двумя обмотками, токи которых сдвинуты по фазе на 90°. Создаваемое статорными обмотками бегущее поле приводит в движение слои металла. При переключении обмоток возможно изменение направления движения металла. Частота тока в статоре перемешивающего устройства от 0,3 до 1,1 Гц. Питание устройства производится от электромашинного преобразователя частоты.

Двигатели, обслуживающие механизмы дуговых печей, работают в тяжелых условиях (пыльная среда, близкое расположение сильно нагретых конструкций печи), поэтому они имеют закрытое исполнение с теплостойкой изоляцией (краново-металлургических серий).

Печные трансформаторные агрегаты. В установках дуговых печей используются специально предназначенные для них трехфазные масляные трансформаторы. Мощность печного трансформатора является после емкости вторым важнейшим параметром дуговой печи и определяет длительность расплавления металла, что в значительной степени сказывается на производительности печи. Полное время плавки стали в дуговой печи составляет до 1—1,5 ч для печей емкостью до 10 т и до 2,5 ч для печей емкостью до 40 т. Новые установки печей комплектуются печными трансформаторными агрегатами повышенной мощности типов ЭТМПК, ЭТЦПК и др.

В обозначении типа трансформаторного агрегата: Э — электропечной; Т — трехфазный; М — естественное масляное охлаждение; Ц — масляно-воздушное охлаждение; П или Н — переключающее устройство ПБВ (переключение без возбуждения, т. е. без нагрузки) или РПН (регулирование под нагрузкой); К — комплектный (агрегат, состоящий из трансформатора и реактора). При этом, например, для печей типа ДС-0,5А мощность трансформатора составляет 630 кВ·А, типа ДС-3М2 — 2000 кВ·А, типа ДСП-12Н — 8000 кВ·А (с возмож-

ностью перегрузки на 20% на время расплавления), для печи типа ДМБ-0,5 — 400 кВ·А.

Напряжение на печи в ходе плавки требуется изменять в довольно широких пределах. На первом этапе плавки, когда происходит расплавление скрапа, в печь должна вводиться максимальная мощность, чтобы ускорить этот процесс. Но при холодной шихте дуга неустойчива. Поэтому для увеличения мощности необходимо повышать напряжение. Продолжительность этапа расплавления составляет 50% и более от общего времени плавки, при этом потребляется 60—80% электроэнергии. На втором и третьем этапах — при окислении и рафинировании жидкого металла (удалении вредных примесей и выжигании лишнего углерода) дуга горит спокойнее, температура в печи выше, длина дуги увеличивается. Во избежание преждевременного выхода из строя футеровки печи дугу укорачивают, снижая напряжение. Кроме того, для печей, в которых могут выплавляться разные марки металла, соответственно изменяются условия плавки, а значит, и требуемые напряжения.

Для обеспечения возможности регулирования напряжения печей питающие их трансформаторы выполняют с несколькими ступенями низкого напряжения, обычно с переключением отпаек обмотки высокого напряжения (12 ступеней и более). Вторичное линейное напряжение для трансформаторов мощностью до 8000 кВ·А регулируется в пределах от $U_{2max} \approx 220 \div 320$ В до $U_{2min} \approx 100 \div 120$ В; для трансформаторов большей мощности — от $U_{2max} \approx 370 \div 510$ В до $U_{2min} \approx 130 \div 185$ В. Трансформаторы мощностью до 10 000 кВ·А снабжены переключающим устройством ПБВ. Более мощные трансформаторы имеют переключающее устройство РПН. Для небольших печей применяют две — четыре ступени, а также простейший способ регулирования напряжения — переключение обмотки высокого напряжения (ВН) с треугольника на звезду.

Для обеспечения устойчивого горения дуги переменного тока и ограничения толчков тока при коротких замыканиях (к.з.) между электродом и шихтой 2—3-кратным значением номинального тока электрода общее относительное реактивное сопротивление установки должно составлять 30—40%. Реактивное сопротивление печных трансформаторов равно 6—10%, сопротивление короткой сети для малых печей 5—10%. Поэтому со стороны ВН трансформатора для печей емкостью до 40 т предусматривают предвключенный реактор с сопротивлением около 15—25%, входящий в комплект трансформаторного агрегата. Реактор выполнен как дроссель с ненасыщающимся сердечником.

Электрическая схема силовой цепи дуговой печи. Схема питания типовой электропечной дуговой установки для фасонного литья показана в упрощенном виде на рис. 1-19. Здесь *ЭПД* — электропечь дуговая. Маломасляный или воздушный печной выключатель *ВП1* предназначен для оперативного включения и отключения печного трансформатора *ТрП* при всех нагрузках — от холостого хода до коротких замыканий. Разъединитель *В* служит для подачи и снятия напряжения при отключенном выключателе *ВП1*. Перед печным трансформатором включен токоограничивающий реактор *РТО*, который по окончании расплавления шихты шунтируется выключателем *ВП2*. При этом первичная обмотка трансформатора пересоединяется с треугольника на звезду при помощи переключателя *П* (на время переключения цепь питания печи обесточивается при помощи *ВП1*).

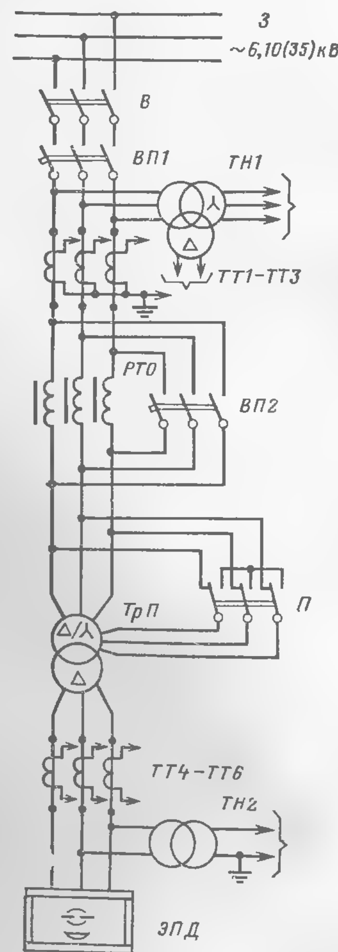


Рис. 1-19. Электрическая схема питания дуговой печи.

Трансформаторы тока *ТТ1—ТТ3* и *ТТ4—ТТ6* на первичной и вторичной сторонах печного трансформатора и трансформаторы напряжения *ТН1* и *ТН2* служат для подключения измерительных приборов и ап-

паратуры управления и защиты. Установки дуговых печей оснащаются релейной защитой от токов к. з. на стороне *ВН* трансформатора *ТрП* и от перегрузки, которая может иметь место при работе печи. Защита от к. з. отключает установку, воздействуя на выключатель *ВП1*, и выполняется как токовая защита мгновенного действ-

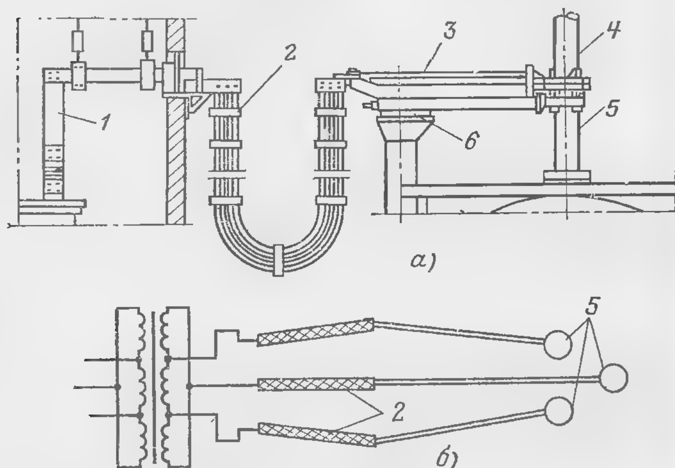


Рис. 1-20. Короткая сеть печной установки.

вия. Защита от перегрузки обычно воздействует с выдержкой времени на сигнал.

Все трансформаторы для питания дуговых печей снабжают газовой защитой. Газовая защита, как основная защита печного трансформатора, выполнена двухступенчатой: первая ступень воздействует на сигнал, вторая отключает установку.

Короткая сеть дуговой установки (рис. 1-20, *а*) состоит из ошиновки *1* в трансформаторной камере, гибкой кабельной гирлянды *2*, трубошин *3*, электрододержателя *4* и электрода *5*, перемещающихся вместе с кареткой *6*. На печах емкостью до 10 т используют схему «звезда на электродах» (рис. 1-20, *б*), когда вторичные обмотки печного трансформатора соединены в треугольник на выходе из камеры. Другие схемы короткой сети, позволяющие уменьшить ее реактивное сопротивление, применяют на более мощных печах.

Автоматическое регулирование мощности дуговых печей. Для обеспечения нормальной и высокопроизводительной работы дуговые печи оборудуются автоматическими регуляторами мощности (АР), которые осуществляют поддержание постоянства заданной мощности электрической дуги. Работа АР основана на изменении положения электродов относительно загрузки — в печах прямого нагрева или друг относительно друга — в печах косвенного нагрева, т. е. в обоих случаях используется регулирование длины дуги. Исполнительными органами АР чаще всего служат электродвигатели, но некоторые печи имеют АР с гидроприводом электродов. Трехфазные печи оснащаются отдельными АР для каждого электрода и одним резервным. Обязательно предусматривается и ручное регулирование перемещения электродов.

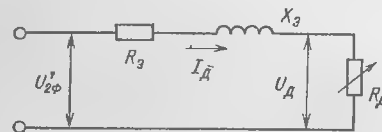


Рис. 1-21. Схема замещения дуговой печи.

Удельный расход электроэнергии и производительность дуговой печи зависят не только от технологических факторов, но и от того, насколько правильно выдерживается заданный электрический режим печи. На рис. 1-21 изображена упрощенная схема замещения для одной фазы установки дуговой печи. Здесь $U'_{2ф}$ — расчетное вторичное фазное напряжение трансформатора, под которым понимается фазное напряжение $U_{1ф}$ питающей сети, приведенное ко вторичной обмотке трансформатора, т. е. $U'_{2ф} = U_{1ф}/n$, где n — коэффициент трансформации для данной ступени напряжения; $R_э$ и $X_э$ — суммарные активное и индуктивное сопротивления фазы печной установки, приведенные ко вторичному напряжению; $R_д$, $I_д$ и $U_д$ — активное сопротивление, ток и напряжение дуги.

Согласно этой схеме можно записать:

$$U_д = \sqrt{U'^2_{2ф} - (I_д X_э)^2} - I_д R_э. \qquad (1\text{-}13)$$

Известно, что у мощных дуг напряжение практически не зависит от тока и линейно связано с длиной дуги:

$$U_д = \alpha + \beta l_д, \qquad (1\text{-}14)$$

где α — сумма катодного и анодного падения напряжения, В;
β — падение напряжения на единицу длины столба дуги, В/мм;
$l_д$ — длина дуги, мм.

Значения α и β изменяются в ходе плавки. В среднем $\alpha=20$, $\beta=4$ в период расплавления и $\beta=1$ в период рафинирования.

Из выражений (1-13) и (1-14) видно, что ток дуги зависит от фазного напряжения печи и длины дуги. При неизменном $U'_{2ф}$ с

4—612

возрастанием $l_д$ и соответственно напряжения $U_д$ ток $I_д$ уменьшается и, наоборот, увеличивается с уменьшением $l_д$. С увеличением $U_{2ф}$ при постоянной длине дуги $l_д$ ток $I_д$ становится больше. Поэтому активная мощность $P_д = U_д I_д$, выделяемая дугой, при заданном фазном напряжении имеет максимум $P_{д,max}$ при некотором значении $l_{д,max}$ и соответствующем значении тока $I_{д,max}$. Следовательно, одному и тому же значению $P_д$ отвечают два разных режима: при $l_д < l_{д,max}$, $I_д > I_{д,max}$ и при $l_д > l_{д,max}$, $I_д < I_{д,max}$. По этой причине мощность $P_д$ не может быть непосредственно использована как параметр автоматического регулирования электрического режима печи, и в современных АР применяют регулирование по косвенному параметру, в качестве которого берут разность сигналов, пропорциональных току дуги $I_д$ и напряжению фазы $U_{2ф}$. Подобные регуляторы называют дифференциальными.

Режим для каждого этапа плавки выбирают так, чтобы задаваемое значение $I_{д,з}$ было меньше $I_{д,max}$, так как при $I_{д,з} > I_{д,max}$ печная установка работала бы с низкими значениями КПД и коэффициента мощности. При заданных значениях $U'_{2ф,з}$ и $I_{д,з}$ однозначно будет задана и мощность $P_{д,з}$, поскольку величины $X_э$ и $R_э$ постоянны. Также однозначно определится для заданного режима и напряжение на зажимах вторичной обмотки печного трансформатора $\dot{U}_{2ф,з} = \dot{U}'_{2ф,з} - \dot{I}_{д,з} Z'_э$, где $Z'_э$ — полное суммарное приведенное сопротивление обмоток трансформатора и дросселя.

Следовательно, задаваемый сталеваром или оператором электрический режим печи можно полностью охарактеризовать двумя величинами: $I_{д,з}$ и $U_{2ф,з}$. Параметр регулирования АР

$$A = aI_д - bU_{2ф}. \qquad (1\text{-}15)$$

Коэффициенты пропорциональности a и b подбираются так, чтобы в заданном режиме

$$A = aI_{д,з} - bU_{2ф,з} = 0.$$

Тогда при любом отклонении режима от заданного $A \neq 0$, что вызовет соответствующую реакцию регулятора и он, воздействуя на исполнительный двигатель, автоматически обеспечит перемещение электрода так, чтобы вновь восстановился заданный режим.

Однако практически регулятор может пустить двигатель и осуществить перемещение электрода лишь после того, как параметр A изменится от нуля на определенную малую величину, называемую зоной нечувствительности. Эта зона характеризуется отклонениями тока дуги $\pm\Delta I_д$ от заданного значения, при которых прекратится или соответственно начнется перемещение электрода (в пределах зоны нечувствительности можно считать, что напряжение $U_{2ф}$ не изменится). Наличие зоны нечувствительности регулятора обусловлено в первую очередь моментом сил сопротивления механизма перемещения. Требуется некоторое минимальное напряжение на двигателе, зависящее от величины A, чтобы двигатель преодолел момент сил трения и неуравновешивания электрододержателя с электродом и начал вращаться. Кроме того, некоторая минимальная ширина зоны нечувствительности регулятора необходима для того, чтобы избежать возникновения колебательного неустойчивого процесса при остановке электрода. Желательно, чтобы тормозной путь электрода $l_т$ в самом неблагоприятном случае (при торможении с максимальной скорости) не превышал значения $2\Delta l_д$, где $\Delta l_д$ — изменение

длины дуги, соответствующее изменению тока на величину $\Delta I_д$, т. е. чтобы торможение заканчивалось в пределах зоны нечувствительности. Процесс регулирования будет при этом апериодическим. Если же $l_т > 2\Delta l_д$, то электрод пройдет зону нечувствительности, а это приведет к повторной реакции АР, но теперь на перемещение электрода в противоположном направлении. В этом случае регулирование будет иметь уже колебательный характер. При слишком узкой зоне нечувствительности по сравнению с тормозным путем колебания могут продолжаться и далее, что недопустимо. В ряде случаев это обстоятельство вынуждает ограничивать максимальную скорость перемещения электрода, что, естественно, снижает быстродействие регулятора. В современных АР зона нечувствительности по току не превышает ±5—10%.

Регулятор должен обладать достаточно высоким быстродействием, обеспечивая ликвидацию крупных нарушений заданного режима (таких, как к. з. или обрывы дуги) в течение 1,5—3 с. Он должен осуществлять автоматическое зажигание дуг печи и плавное изменение задаваемой мощности в пределах 20—125% номинальной, а при исчезновении питающего печь напряжения останавливать электроды.

Применяемые в настоящее время дифференциальные регуляторы мощности ДСП с электроприводом механизма перемещения электродов различаются в первую очередь типом основного усилителя, питающего двигатель постоянного тока.

На рис. 1-22 приведена принципиальная электрическая схема регулятора типа РМД-М (регулятор мощности дуги модернизированный). Якорь двигателя *Д* перемещения электрода *Э* подключен к электромашинному усилителю *ЭМУ*, якорь которого приводится во вращение короткозамкнутым асинхронным двигателем. В измерительной части *ИЧ* схемы сигнал, пропорциональный току дуги, от трансформатора тока *ТТ* через автотрансформатор *АТ* и выпрямитель *ВпТ* поступает на плечо *R3* потенциометра сравнения *R3*, *R4*. На плечо *R4* этого же потенциометра приходит сигнал, пропорциональный напряжению фазы (через предохранитель *Пр*, резистор *R2*, трансформатор напряжения *ТН* и выпрямитель *ВпН*). Разность этих сигналов — напряжение управления $u_у = aI_д - bU_{2ф}$ — поступает на обмотку управления электромашинного усилителя *ОУ1*. Параметры измерительной части схемы подобраны так, что при нормальном (заданном) режиме работы печи напряжение $u_у = 0$. Требуемое значение тока дуги задается перемещением щетки автотрансформатора *АТ*, т. е. изменением

Рис. 1-22. Электрическая схема регулятора РМД-М (на одну фазу).

соотношения между значением тока дуги и напряжением на выходе *АТ*, причем при любом $I_{д,з}$ напряжение $aI_{д,з}$ на плече *R3* потенциометра *R3*, *R4* будет сохраняться одним и тем же. Также и на плечо *R4* потенциометра *R3*, *R4*, независимо от выбранной ступени напряжения, всегда подается практически одно и то же по значению напряжение благодаря шунтированию части резистора *R2* при помощи контактов *ПС* переключателя ступеней печного трансформатора. Таким образом, в любом случае, если режим работы печи отвечает заданному (в пределах зоны нечувствительности регулятора по току $\pm\Delta I_д$), напряжение на якоре *ЭМУ* будет меньше напряжения трогания двигателя *Д*, и электрод *Э* неподвижен.

После включения печного трансформатора при поднятых электродах на плече *R4* потенциометра *R3*, *R4* появляется напряжение от выпрямителя *ВпН*. Усилитель *ЭМУ* возбуждается, и двигатель *Д* через передаточный механизм *ПМ* опускает электрод. Аналогично будут работать и регуляторы двух других фаз печи.

При соприкосновении электрода с шихтой (если к шихте подошел только один этот электрод) напряжение выпрямителя *ВпН*, а следовательно, и на обмотке *ОУ1*, становится равным нулю, ЭДС *ЭМУ* спадает, и двигатель быстро затормаживается. Когда с шихтой соприкоснется другой электрод, на обмотку *ОУ1* с плеча *R3* потенциометра *R3*, *R4* подается максимальное напряжение выпрямителя *ВпТ*, обусловленное током к.з. двух фаз. Усилитель *ЭМУ* возбуждается с противоположной полярностью напряжения на якоре, и начинается разгон двигателя *Д* на подъем электрода.

После зажигания дуги по мере подъема электрода уменьшаются ток в цепи трансформатора тока *ТТ* и напряжение выпрямителя *ВпТ*, а напряжение выпрямителя *ВпН* возрастает. Поэтому напряжение на обмотке *ОУ1* уменьшается, угловая скорость двигателя *Д* снижается и процесс подъема электрода замедляется. Когда ток дуги станет близким к заданному значению на верхней границе зоны нечувствительности (т. е. при $I_д = I_{д,з} + \Delta I_д$), двигатель останавливается.

Таким образом, с момента первого зажигания дуги начинаются автоматические действия регулятора, обеспечивающие поддержание заданного режима работы печи. В частности, при подплавлении шихты увеличи-

вается длина дуги, вследствие чего уменьшается ток и возрастает напряжение дуги. В результате на обмотку *ОУ1* подается напряжение такой полярности, что электрод будет опускаться, пока не восстановится заданный режим. Если произошло увеличение тока дуги, то двигатель поднимает электрод и т. д. При обрыве дуги или к. з. работа регулятора протекает аналогично описанной выше.

В схеме на рис. 1-22 предусмотрены также дополнительные узлы, способствующие улучшению качества работы регулятора. Обмотка управления *ОУ2 ЭМУ* используется как обмотка жесткой отрицательной обратной связи по напряжению *ЭМУ*. Ее магнитодвижущая сила (МДС) всегда направлена навстречу МДС основной обмотки *ОУ1*. Обмотка *ОУ2* выполняет две функции: ослабляет влияние остаточного намагничивания *ЭМУ*, которое весьма велико в таких усилителях, и обеспечивает форсировку (убыстрение) переходных процессов нарастания и спадания напряжения ЭМУ, что способствует сокращению времени разгона и торможения двигателя *Д*. Интенсивность действия обратной связи можно регулировать резисторами *R8* и *R9*. Кроме того, при помощи диода *Д3* осуществляется усиление действия обмотки *ОУ2* при опускании электрода с тем, чтобы снизить скорость перемещения электрода по сравнению с подъемом. Диоды *Д1* и *Д2* уменьшают коэффициент усиления регулятора при больших значениях напряжения $u_у$ (в частности, при к. з. и обрыве дуги), что облегчает получение апериодического или близкого к нему процесса регулирования.

В схеме используется также стабилизирующий трансформатор *ТрС* с четырьмя обмотками. Обмотки *3* и *4* этого трансформатора реализуют гибкую отрицательную обратную связь по напряжению *ЭМУ*, что способствует успокоению колебаний в процессе регулирования. Обмотки *1* и *2* трансформатора *ТрС* служат для введения в сигнал управления $U_у$ составляющей, пропорциональной скорости изменения тока дуги $di_д/dt$. Это форсирует нарастание напряжения *ЭМУ* в начале регулирования и ускоряет его затухание в конце.

При исчезновении питающего печь напряжения сигнал $u_у$ становится равным нулю, и двигатель немедленно останавливается.

Переход с автоматического регулирования на ручное управление перемещением электрода печи осуществляется при помощи двух универсальных переключателей, не показанных в схеме на рис. 1-22. Первый из них шунтирует вторичную цепь трансформатора *ТТ* и отключает трансформатор *ТН*, а второй отключает обмотку *ОУ1* от потенциометра *R3*, *R4* и присоединяет ее к постороннему источнику питания с той или иной полярностью, соответствующей движению электрода вверх или вниз. Для остановки электрода этот переключатель устанавливается в нейтральное положение.

Автоматические регуляторы типа РМД-М имеют исполнительные двигатели мощностью от 1,9 до 14 кВт. Такими регуляторами оснащено большинство действующих установок дуговых печей емкостью до 5 т. Однако они недостаточно надежны и не обеспечивают устойчивой работы при скорости перемещения электродов на подъем большей 1,5 м/мин, что в современных условиях уже недостаточно с точки зрения быстродействия.

Поэтому при модернизации установок печей малой емкости (до 5 т) рекомендуется заменять регуляторы типа РМД-М на регуляторы с магнитными усилителями типа АРДМ-М-2,2 (автоматический регулятор дуги, механическая передача, магнитный усилитель, мощность двигателя 2,2 кВт). Этот регулятор [31] отличается от регулятора типа РДМ-М главным образом тем, что вместо ЭМУ используется реверсивный силовой магнитный усилитель с выходом на постоянном токе и, кроме того, в схему введен промежуточный магнитный усилитель, который служит для усиления сигнала от измерительной части регулятора. Регулятор типа АРДМ-М обеспечивает максимальную скорость электрода 2,5 м/мин при подъеме. При спуске электрода максимальная скорость уменьшается в 2 раза.

В настоящее время все новые установки ДСП емкостью не менее 1,5 т оснащаются наиболее совершенными автоматическими регуляторами мощности на тиристорах типа АРДМТ (автоматический регулятор дуги, механическая передача, тиристорный) с малоинерционными двигателями перемещения электродов типа ПБСТ или ПГТ мощностью от 1 до 11 кВт.

На рис. 1-23 приведена упрощенная принципиальная электрическая схема регулятора типа АРДМТ. В этом регуляторе якорь двигателя Д получает питание от реверсивного тиристорного преобразо-

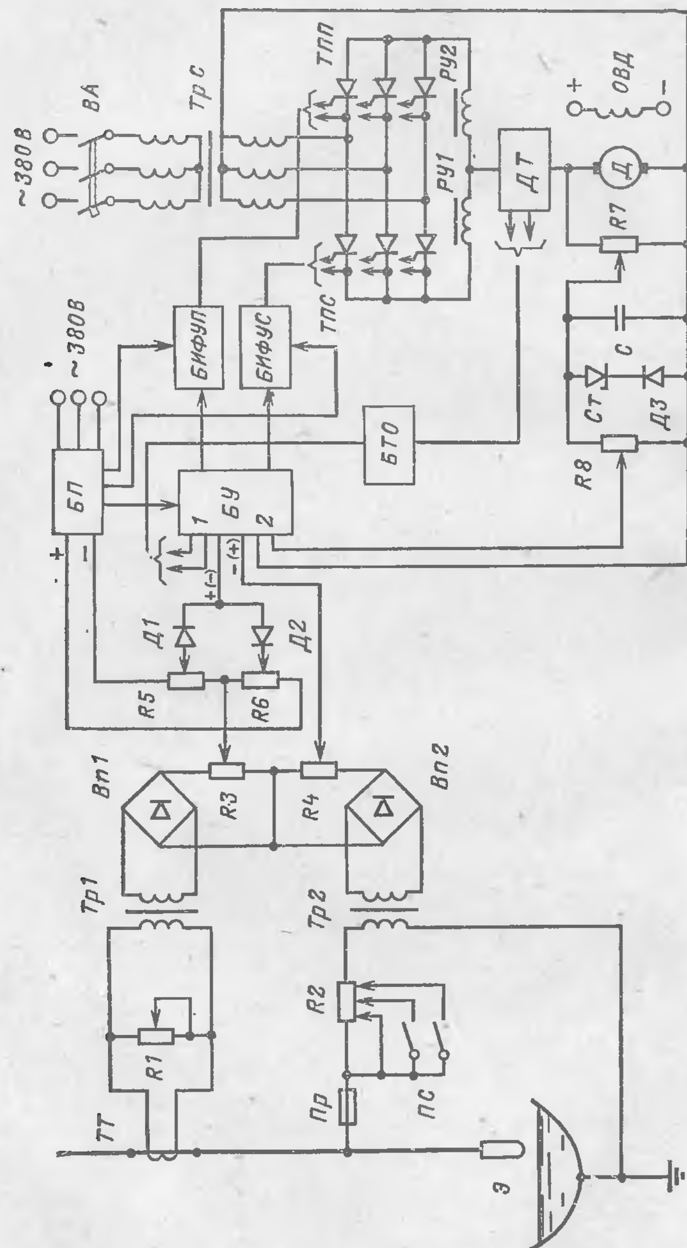


Рис. 1-23. Электрическая схема регулятора АРДМТ (на одну фазу).

вателя, состоящего из двух комплектов тиристоров: *ТПС* и *ТПП*. Преобразователь выполнен по трехфазной нулевой встречно-параллельной схеме с силовым трансформатором *ТрС* и уравнительными реакторами *РУ1* и *РУ2*. Управление тиристорами — совместное. Оно осуществляется при помощи двух блоков импульсно-фазового управления *БИФУС* и *БИФУП*, на входы которых поступают сигналы от блока управления *БУ*. В зависимости от знака результирующего сигнала на входе *БУ* фаза отпирающих тиристоры импульсов, формируемых в *БИФУС* и *БИФУП*, соответствует выпрямительному режиму одного из комплектов *ТПС* или *ТПП*. Второй комплект при этом может функционировать только в инверторном режиме. При работе *ТПС* выпрямителем двигатель *Д* осуществляет спуск, а при работе *ТПП* выпрямителем — подъем электрода. Измерительная часть схемы в принципе подобна рассмотренным ранее. Разность сигналов $aI_д — bU_{2ф}$ с плеч потенциометра *R3*, *R4* поступает на вход *БУ*. При заданном режиме $aI_{д,з} — bU_{2ф,з} = 0$. Напряжение на входе *БУ* также равно нулю. Тиристоры комплектов *ТПП* и *ТПС* заперты, двигатель неподвижен. Если ток дуги станет больше заданного, то на входе *БУ* между точками *1* и *2* появится напряжение, полярность которого отмечена на схеме (без скобок). В результате комплект тиристоров *ТПП* будет переведен в выпрямительный режим, что вызовет пуск двигателя *Д* в направлении перемещения электрода вверх. После восстановления электрического режима печи двигатель остановится. При уменьшении тока дуги по сравнению с заданным напряжение между точками *1* и *2* изменит полярность, произойдет перевод в выпрямительный режим комплекта тиристоров *ТПС*, что обеспечит опускание электрода.

В схеме использована жесткая отрицательная обратная связь по напряжению якоря двигателя *Д*. Сигнал обратной связи снимается с потенциометра *R7*, сглаживается конденсатором *С* и далее с потенциометра *R8* подается на вход *БУ* встречно сигналу рассогласования. Эта связь улучшает работу регулятора при колебаниях напряжения сети 380 В и других возмущениях. При подъеме электрода в случаях больших нарушений режима печи (например, при к. з. электрода) сигнал обратной связи ограничивается стабилитроном *Ст*, что ограничивает максимальную скорость подъема величиной 5 м/мин. Опускание электрода происходит при скорости не менее 2 м/мин.

Узел схемы, состоящий из потенциометра *R5*, *R6* и диодов *Д1* и *Д2*, выполняет функции задания ширины зоны нечувствительности регулятора. Сигнал рассогласования проходит на вход *БУ* только после того, как его значение превысит падение напряжения от постороннего источника на соответствующем плече потенциометра *R5*, *R6*: на плече *R5* при $aI_д > bU_{2ф}$ или плече *R6* при $aI_д < bU_{2ф}$. Зону нечувствительности можно регулировать в пределах от 3 до 10%.

Для ограничения толчков тока якоря двигателя в допустимых пределах служит блок токоограничения *БТО* с датчиком тока *ДТ*. Сигнал от блока *БТО* подается на вход блока *БУ*. Полярность этого сигнала такая, что при возрастании тока якоря выше установленного заранее значения выпрямленное напряжение комплекта тиристоров, работающего выпрямителем, уменьшается, а комплекта тиристоров, работающего инвертором, увеличивается. Инверторный режим преобразователя возникает в процессе торможения двигателя при его остановке или реверсе. Работавший до начала торможе-

ния выпрямителем комплект тиристоров запирается, а другой комплект тиристоров воспрнинимает тормозной ток двигателя, работая инвертором.

1-4. ИНДУКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Индукционные ЭТУ включают в себя плавильные и нагревательные установки, а по частоте питающего тока охватывают широкую полосу от промышленной частоты (50 Гц) до средней (0,5—10 кГц) и высокой (сотни и тысячи килогерц).

Конструктивное исполнение индукционных плавильных печей. Для рабочего процесса индукционных плавильных печей характерно электродинамическое и тепловое движение жидкого металла в ванне или тигле, способствующее получению однородного по составу металла и его равномерной температуры по всему объему, а также малый угар металла (в несколько раз меньше, чем в дуговых печах). Эти факторы обусловили широкое применение индукционных плавильных печей при производстве фасонного литья из черных и цветных металлов. Рабочие температуры печей: для стали 1600° С, чугуна 1200—1400° С, меди 1200° С и алюминия 750° С.

Индукционные плавильные печи можно разделить на канальные печи промышленной частоты и тигельные печи промышленной, средней и высокой частоты.

Особенности конструкции индукционной *канальной печи* (печи со стальным сердечником) иллюстрирует рис. 1-24, *а*. Здесь схематически изображена однофазная печь. Она представляет собой футерованную ванну *3*, заключенную в металлический кожух *2* и снабженную в данном случае одной однофазной индукционной единицей. Последняя состоит из индуктора *8*, шихтованного магнитопровода *6* (сердечника) из трансформаторной стали и подового камня *7* с охватывающими индуктор плавильными каналами *4*. Камень *7* заключен в металлический кожух. Индукционные единицы часто делают отъемными, чтобы можно было их заменять без охлаждения футеровки ванны.

Для слива металла *1* через сливной носок *9* печь наклоняется обычно при помощи гидропривода (в некоторых печах ванна и кожух выполнены в виде барабана по типу дуговой печи косвенного нагрева, а слив металла производится через отверстие в торцевой стенке печи при повороте барабана с помощью электропривода).

Загрузку печи ведут сверху через проем, закрытый во время плавки футерованной крышкой *10*. Подъем крышки производится при помощи гидро- или электропривода.

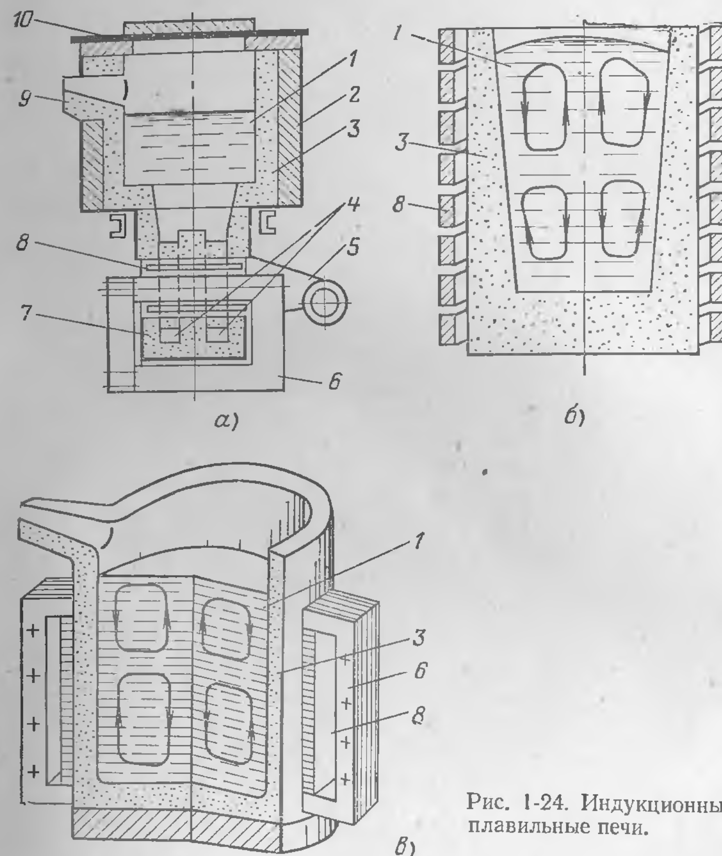


Рис. 1-24. Индукционные плавильные печи.

Индуктор печи изготовляют из профилированной медной трубки с водяным охлаждением. Подовый камень охлаждается воздухом при помощи вентилятора *5* через зазор между индуктором и подовым камнем. Ток к индуктору подводится по гибким кабелям.

Замкнутый контур — вторичную «обмотку» трансформатора, первичной обмоткой которого является ин-